

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Marko Puljić**

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

Mentor:

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić, dipl. ing.

Student:

Marko Puljić

Zagreb, 2018.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentorici prof. dr. sc. Tanji Jurčević Lulić na danim savjetima i smjernicama, razumijevanju i uloženom vremenu.

Posebno se zahvaljujem asistentici dr. sc. Jasni Leder Horina na svojoj pomoći, stručnim savjetima i strpljenju, te mnoštvu izdvojenog vremena prilikom pisanja ovoga diplomskog rada.

Veliko hvala kolegici Moniki Barti na pomoći i izdvojenom vremenu prilikom pisanja ovoga diplomskog rada.

Zahvaljujem se svojem prijatelju i kolegi Anti Joziću na pomoći pri izvođenju numeričkih analiza, te prijatelju Berislavu Markotiću na ustupljenoj opremi za izvođenje istih.

Zahvaljujem se svim svojim prijateljima i kolegama koji su bili uz mene i na bilo koji način mi pomogli u tijeku studiranja.

Povrh svih neizmjereno se zahvaljujem svojoj obitelji koja je bila uz mene i bodrila me kroz cijeli studij. Posebno se zahvaljujem svojim roditeljima na tome što su mi svojim radom i vjerom u mene omogućili studiranje, te što su bili najveća motivacija kada bi mi bilo najteže.

*„Što imaš da nisi primio?“*



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur. broj:	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Marko Puljić**

Mat. br.: 0275024455

Naslov rada na  
hrvatskom jeziku:

**Utjecaj parodontnog ligamenta na položaj središta otpora zuba kod  
ortodontske terapije**

Naslov rada na  
engleskom jeziku:

**Periodontal ligament influence on position of tooth centre of resistance  
in orthodontic treatment**

Opis zadatka:

Točnost numeričkih analiza različitih problema u dentalnoj biomehanici ovisi o geometriji i rubnim uvjetima te o opisu mehaničkih svojstava svih konstitutivnih elemenata. Naprezanja i deformacije u periodontalnom ligamentu, koji povezuje korijen zuba i alveolnu kost, imaju velik utjecaj na pregradnju kosti i gibanje zuba kod ortodontske terapije. Središte otpora zuba karakterizira odziv zuba na ortodontsko opterećenje. Središte otpora zuba je točka unutar zuba kroz koju, ako prolazi pravac djelovanja ortodontske sile, dolazi do čiste translacije zuba. Položaj središta otpora ovisi o geometriji i kontaktnoj površini tj. o parodontnom ligamentu i okolnoj kosti.

U radu je potrebno izraditi 3D model jednokorijenskog zuba na temelju CT snimki zuba pacijenta kojemu je preporučena ortodontska terapija. Model treba obuhvaćati zub, parodontni ligament te okolnu alveolnu kost koja se sastoji od kortikalne i spužvaste kosti. Zub i kost su homogeni i izotropni s konstantnim svojstvima materijala, a svojstva parodontnog ligamenta potrebno je varirati kako bi se odredio utjecaj na središte otpora. Analizu provesti metodom konačnih elemenata. Opterećenje i svojstva materijala pojedinih dijelova modela definirati na temelju vrijednosti dostupnih u literaturi i u dogovoru s mentorom.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

16. studenog 2017.

Datum predaje rada:


18. siječnja 2018.


Predviđeni datum obrane:

24., 25. i 26. siječnja 2018.

Zadatak zadao:

Predsjednica Povjerenstva:

  
Prof. dr.sc. Tanja Jurčević Lulić

  
Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

# SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	VI
POPIS OZNAKA .....	VII
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY .....	IX
1. UVOD .....	1
1.1. Zubi.....	2
1.1.1. Klasifikacija i obilježavanje zubi .....	2
1.1.2. Morfologija zuba .....	4
1.1.3. Anatomija zuba .....	5
1.2. Parodont zuba .....	6
1.3. Biomehanika zuba .....	8
1.3.1. Središte otpora i središte rotacije .....	10
1.3.2. Ortodontski pomak zuba .....	12
1.4. Računalna tomografija.....	13
1.4.1. Hounsfield jedinice .....	16
1.5. Mimics Medical 17.0.....	17
2. METODOLOGIJA RADA .....	19
2.1. Kreiranje maski i 3D modela iz CT snimke .....	19
2.2. Kreiranje mreže konačnih elemenata.....	25
2.3. Dodjeljivanje materijalnih svojstava modelima .....	26
2.4. Tetraedarski elementi drugog reda .....	27
2.5. Konvergencija rješenja .....	28
2.6. Rubni uvjeti .....	30
2.6.1. Analize sa homogenim PDL-om .....	32
2.6.2. Analize s heterogenim PDL-om .....	33

3. REZULTATI.....	34
3.1. Deformacija PDL-a kod omjera momenta i sile $M/F = -5$ .....	35
3.2. Deformacija PDL-a kod omjera momenta i sile $M/F = -5/3$ .....	36
3.3. Deformacija PDL-a kod omjera momenta i sile $M/F = -1$ .....	37
3.4. Postupak određivanja položaja središta otpora.....	38
3.4.1. Položaj središta otpora kod linearne analize s homogenim PDL-om.....	40
3.4.2. Položaj središta otpora kod nelinearne analize s homogenim PDL-om.....	41
3.4.3. Položaj središta otpora kod linearne analize s heterogenim PDL-om.....	42
3.4.4. Položaj središta otpora kod nelinearne analize s heterogenim PDL-om.....	43
3.5. Utjecaj promjene tipa analize i materijalnih svojstava PDL-a na položaj središta otpora .....	44
4. ZAKLJUČAK .....	49
LITERATURA.....	50

## POPIS SLIKA

Slika 1. Raspored trajnih zubi i vrijeme njihovog izbijanja [4].....	3
Slika 2. Obilježavanje zubi binarnim sustavom [5].....	4
Slika 3. Morfološki dijelovi zuba [6].....	5
Slika 4. Anatomski dijelovi zuba [6].....	6
Slika 5. Građa parodonta zuba [9].....	6
Slika 6. Zubna alveola [11].....	7
Slika 7. Prikaz karakterističnih zubnih ravnina [12].....	8
Slika 8. Mezijalne plohe i mezijalni smjer (plavo), distalne plohe i distalni smjer (crveno) [12].....	9
Slika 9. Okulzalne plohe zuba [12].....	9
Slika 10. Oblici zubnih lukova gornje i donje čeljusti [12].....	10
Slika 11. Položaj središta otpora i translacija zuba [14].....	11
Slika 12. Položaj središta rotacije [14].....	11
Slika 13. Položaj središta rotacije i otpora kod nekontroliranog (lijevo) i kontroliranog (desno) naginjanja [14] .....	12
Slika 14. Prikaz djelovanja ortodontske sile na zub [16].....	13
Slika 15. Prikaz CT snimke glave [19].....	14
Slika 16. Shema rada CT uređaja [20].....	15
Slika 17. Izgled današnjeg CT uređaja [21].....	15
Slika 18. Princip rada CBCT-a [22].....	16
Slika 19. Prikaz HU vrijednosti za pojedine anatomske cjeline i tkiva [25].....	17
Slika 20. Prikaz CT snimke učitane u Mimics.....	20
Slika 21. Prikaz odabira HU vrijednosti za zub.....	21
Slika 22. Prikaz maske i 3D modela zuba .....	21
Slika 23. Prikaz maske i 3D modela kortikalnog dijela alveolne kosti.....	22
Slika 24. Prikaz maske i 3D modela trabekularnog dijela alveolne kosti.....	22
Slika 25. Prikaz 3D modela kortikalne i trabekularne kosti.....	23

Slika 26. Prikaz maske i 3D modela PDL-a.....	23
Slika 27. 3D model zuba i kosti.....	24
Slika 28. 3D model zuba i PDL-a.....	24
Slika 29. Prikaz mreže konačnih elemenata na površini 3D modela.....	25
Slika 30. Prikaz konačnih elemenata unutar 3D modela.....	26
Slika 31. Dodjeljivanje materijala mreži 3D elemenata prema maskama.....	27
Slika 32. Osnovni tetraedarski element [27].....	28
Slika 33. Tetraedarski element drugog reda [27].....	28
Slika 34. Konvergencija rezultata pomaka u ovisnosti o broju konačnih elemenata.....	29
Slika 35. Prikaz mreže konačnih elemenata odabranog modela.....	30
Slika 36. Prikaz položaja hvatišta sile i momenta.....	31
Slika 37. Prikaz rubnih uvjeta.....	32
Slika 38. Prikaz pozicija pojedine regije na PDL-u.....	33
Slika 39. Raspodjela duljinskih deformacija homogenog i heterogenog PDL-a kod linearno elastične analize, $M/F = -5$ .....	35
Slika 40. Raspodjela stvarnih duljinskih deformacija homogenog i heterogenog PDL-a kod nelinearne analize, $M/F = -5$ .....	35
Slika 41. Raspodjela duljinskih deformacija homogenog i heterogenog PDL-a kod linearno elastične analize, $M/F = -5/3$ .....	36
Slika 42. Raspodjela stvarnih duljinskih deformacija homogenog i heterogenog PDL-a kod nelinearne analize, $M/F = -5/3$ .....	37
Slika 43. Raspodjela duljinskih deformacija homogenog i heterogenog PDL-a kod linearno elastične analize, $M/F = -1$ .....	37
Slika 44. Raspodjela stvarnih duljinskih deformacija homogenog i heterogenog PDL-a kod nelinearne analize, $M/F = -1$ .....	38
Slika 45. Linija za praćenje pomaka zub.....	39
Slika 46. Prikaz zuba, pomaka zuba i pozicije djelovanja momenta i sile.....	40
Slika 47. Krivulje pomaka kod linearne analize i homogenog PDL-a.....	40



Slika 48. Krivulje pomaka kod nelinearne analize i homogenog PDL-a.....	41
Slika 49. Krivulje pomaka kod linearne analize i heterogenog PDL-a.....	42
Slika 50. Krivulje pomaka kod nelinearne analize i heterogenog PDL-a.....	43
Slika 51. Dijagrami pomak ruba krune zuba u ovisnosti o promjeni omjer momenta i sile $M/F$ , te promjene tipa analize.....	45
Slika 52. Razlike u naprezanjima kod linearne i nelinearne analize, $M/F = -5$ .....	46
Slika 53. Razlike u naprezanjima kod linearne i nelinearne analize, $M/F = -5/3$ .....	46
Slika 54. Razlike u naprezanjima kod linearne i nelinearne analize, $M/F = -1$ .....	47
Slika 55. Položaji središta otpora kod homogenog i heterogenog PDL-a.....	47

## POPIS TABLICA

Tablica 1. HU vrijednosti željenih anatomskih dijelova.....	20
Tablica 2. Mehanička svojstva materijala modela.....	29
Tablica 3. Prikaz broja elemenata i čvorova odabranog modela.....	30
Tablica 4. Mehanička svojstva materijala modela sa homogenim PDL-om.....	32
Tablica 5. Mehanička svojstva materijala modela sa heterogenim PDL-om.....	33
Tablica 6. Izvršene analize.....	34
Tablica 7. Pomak ruba krune zuba u ovisnosti o omjeru momenta i sile, linearna analiza i homogen PDL.....	41
Tablica 8. Pomak ruba krune zuba u ovisnosti o omjeru momenta i sile, nelinearna analiza i homogen PDL.....	42
Tablica 9. Pomak ruba krune zuba u ovisnosti o omjeru momenta i sile, linearna analiza i heterogen PDL.....	43
Tablica 10. Pomak ruba krune zuba u ovisnosti o omjeru momenta i sile, nelinearna analiza i heterogen PDL.....	44
Tablica 11. Utjecaja tipa analize i svojstvo PDL-a na rezultate.....	44

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$\mu$	-	Faktor prigušenja
$u, v, w$	mm	Pomaci u smjeru X, Y i Z osi
$E$	MPa	Modul elastičnosti
$\nu$	-	Poissonov faktor
$\sigma$	MPa	Normalno naprezanje
$F$	N	Sila koja djeluje na krunu zuba
$M$	Nmm	Moment koji djeluje na krunu zuba

## SAŽETAK

Ovim radom analiziran je utjecaj materijalnih svojstava parodontnog ligamenta na položaj središta otpora gornjeg desnog sjekutića kod ortodontske terapije. U programskom paketu Mimics Medical 17.0, iz CT snimki lubanje, izrađen je 3D model. Model se sastoji od zuba, parodontnog ligamenta i alveolne kosti koja se sastoji iz kortikalnog i trabekularnog djela. Model je u programskom paketu Abaqus analiziran kao linearno elastičan i nelinearan koristeći metodu konačnih elemenata. Parodontni ligament je prvo analiziran kao izotropan i homogen, a zatim je podijeljen na pet regija koje su bile izotropne, ali svaka s različitim mehaničkim svojstvima. Na krunu zuba postavljena je sila  $F$  čiji se iznos mijenjao te je iznosio 1 N, 3 N i 5 N, a na istom hvatištu kao i sila, postavljen je i moment  $M$  koji je uvijek iznosio -5 Nmm. S obzirom da su analize bile linearno elastične i nelinearne, s homogenim i heterogenim parodontnim ligamentom te sa tri različite vrijednosti sila, izvršeno je ukupno dvanaest analiza. Analize su pokazale da materijalna svojstva parodontnog ligamenta osjetno utječu na položaj središta otpora zuba.

**Ključne riječi:** parodontni ligament, gornji desni sjekutić, ortodontska terapija, središte otpora, homogen materijal, heterogen materijal, metoda konačnih elemenata, linearno elastična analiza, nelinearna analiza

## SUMMARY

In this thesis the influence of material properties of periodontal ligament on position on center of resistance of upper right incisor was analysed. In Mimics Medical 17.0, from CT scan of skull, a 3D model was built. The model is composed of teeth, periodontal ligament and alveolar bone which consists of cortical and trabecular part. Model is analyzed in Abaqus as linearly elastic and nonlinear using the finite element method. Periodontal ligament was first analyzed as isotropic and homogenous, then divided into five regions that were isotropic, but each with different mechanical properties. The force  $F$  has been applied on dental crown and its magnitude was 1 N, 3 N and 5 N. On the same position was force applied, moment was also applied, and its magnitude was 5 Nmm, and it had same value in all analyses. Since the analyses were linearly elastic and nonlinear, with homogenous and heterogeneous periodontal ligament and with three different force values, twelve analyses were done. Analyses have pointed out that material properties of periodontal ligament significantly affects on the position of tooth center of resistance.

**Keywords:** periodontal ligament, upper right incisor, orthodontic therapy, center of resistance, homogeneous material, heterogeneous material, finite element method, linearly elastic analysis, nonlinear analysis

## 1. UVOD

U radu je potrebno iz CT snimki glave napraviti model koji obuhvaća anatomsku cjelinu koja se sastoji iz zuba, parodontnog ligamenta (PDL) i dijela alveolne kosti. Alveolna kost je podijeljena na kortikalni i trabekularni dio.

Sljedeći korak je analiza modela metodom konačnih elemenata. Zub i kost su homogene i izotropne, s konstantnim svojstvima materijala, dok PDL u prvoj analizi ima konstantna svojstva materijala, a u drugoj je podijeljen na 5 regija gdje su svojstva i dalje izotropna, ali različita po regijama.

Analize su provedene kao linearno elastične i nelinearne, a u zadatku je promatran utjecaj promjene materijalnih svojstava PDL-a na promjenu položaja središta otpora kod ortodontske terapije.

## 1.1. Zubi

Zubi su čvrsti mineralizirani žvačni organi koji se nalaze na početku probavnog trakta, u usnoj šupljini. Izuzev ptica, riba i nekih sisavaca posjeduju ih svi kralježnjaci. Kod čovjeka im je glavna uloga grizenje i žvakanje hrane, dok kod životinja služe i za hvatanje i držanje plijena, te obranu od napada. Čovjek obično ima 32 trajna i 20 mliječnih zubi, gdje prvo dolaze mliječni zubi, koji ispadaju i zamjenjuju ih trajni zubi [1].

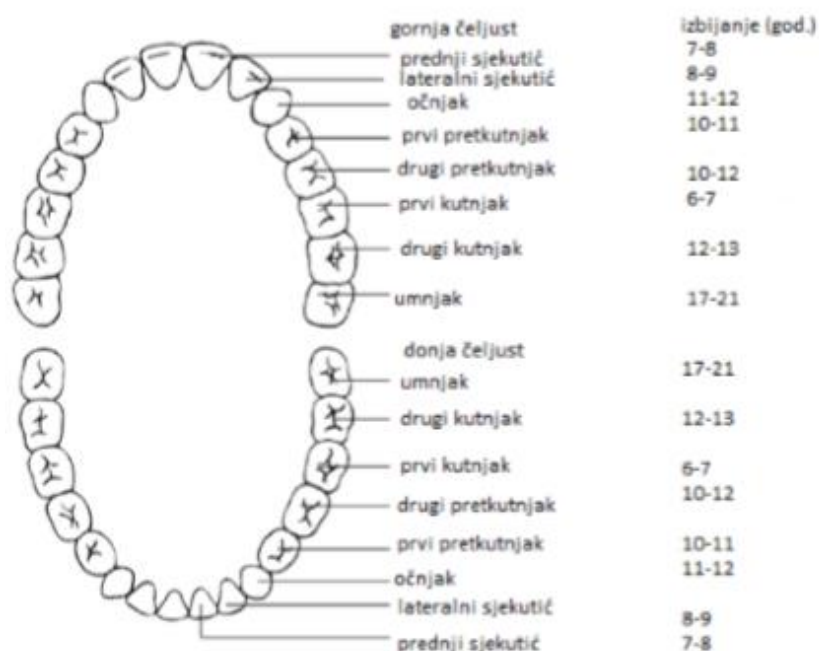
### 1.1.1. Klasifikacija i obilježavanje zubi

Postoji više načina klasifikacije zubi, a najčešća podjela je:

- prema periodu nicanja
  - trajni zubi
  - mliječni zubi
- morfološkom obliku
  - sjekutići (lat. *incisor*)
  - očnjaci (lat. *canin*)
  - pretkutnjaci (lat. *praemolar*)
  - kutnjaci (lat. *molar*)
- lokalizaciji u dentalnom luku
  - gornji i donji
  - desni i lijevi
  - prednji i bočni [2].

Razvoj zuba započinje u šestom tjednu embrionalne faze, te je u potpunosti genetski determiniran. Tada se u području zubnih gredica formira 20 zubnih pupoljaka iz kojih će se potom razviti po jedan mliječni zub. Nicanje zuba najčešće započinje oko šestog mjeseca života, svih 20 zuba izraste do tridesetog mjeseca, a završetak rasta obično bude do treće godine. Od šeste godine života kreće nicanje trajnih zuba, od šeste do dvanaeste godine zastupljeni su zubi obje generacije, a od trinaeste godine prevladavaju trajni zubi. Jedini zub koji iskače iz ovoga slijeda je umnjak, koji obično izbija nakon završetka puberteta [3]. Raspored trajnih zubi, te njihovo vrijeme izbijanja prikazano je na slici 1.

S morfološke strane gledano, oblik zuba evolucijski se prilagodio funkciji koju obavlja u procesu obrade hrane. Glavna funkcija sjekutića je rezanje, komadanje i usitnjavanje hrane. Ima ih ukupno 8, te su tanki i imaju uski rub prilagođen za sječenje hrane. Očnjaci služe za trganje i komadanje čvršće i žilavije hrane, te im je glavna značajka oštrina. U ljudskim ustima su četiri očnjaka, te su oni najduži zubi s jednim dugim i duboko usađenim korijenom. Pretkutnjaci služe za žvakanje i mljevenje hrane. Karakterizira ih dvije oštre kvržice, te ih ima ukupno 8, po 4 u svakoj čeljusti. Kutnjaci imaju 4 do 5 kvržica, plosnatih su površina, a glavna funkcija im je mljevenje i usitnjavanje hrane, potisnute od pretkutnjaka, na lako probavljive komadiće. Ukupno ih je 12, po 6 u svakoj čeljusti i 3 na svakoj strani [3].



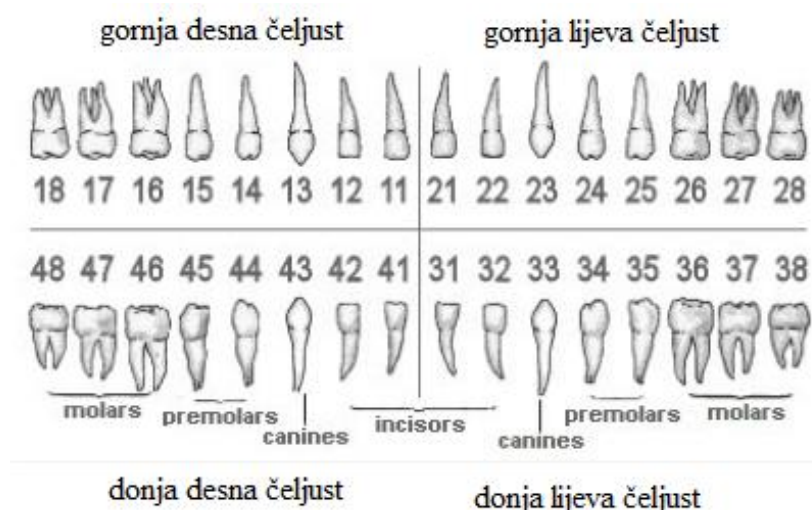
**Slika 1. Raspored trajnih zubi i vrijeme njihovog izbijanja [4]**

Zubi koji se nalaze na gornjoj čeljusti (lat. *maxilla*) nazivaju se gornji zubi, a oni koji se nalaze na donjoj čeljusti (lat. *mandibula*) nazivaju se donji zubi. Središnji sjekutići u gornjoj i donjoj čeljusti nalaze se uz središnju liniju, te ta linija dijeli zube na lijeve i desne. U skupinu prednjih zubi ulaze četiri sjekutića i dva očnjaka iz svake čeljusti, dok stražnje zube čine pretkutnjaci i kutnjaci [1].

Obilježavanje zubi unificiralo se 1970. godine u Bukureštu na zasjedanju Međunarodne stomatološke federacije, gdje je izabran binarni bročani sustav obilježavanja. Zubni lukovi kod trajnih zuba podijeljeni su na 4 kvadranta, gdje je 1 – gornji desni kvadrant, 2 – gornji lijevi



kvadrant, 3 – donji lijevi i 4 – donji desni kvadrant. Četiri kvadranta mliječnih zuba podijeljeni su brojevima od 5 – 8. Drugi broj binarnog sustava označava gdje se zub nalazi u odnosu na medijalnu ravninu. Tako se npr. donji lijevi centralni sjekutić označava s 31 [2]. Označavanje zubi binarnom metodom prikazano je na slici 2.

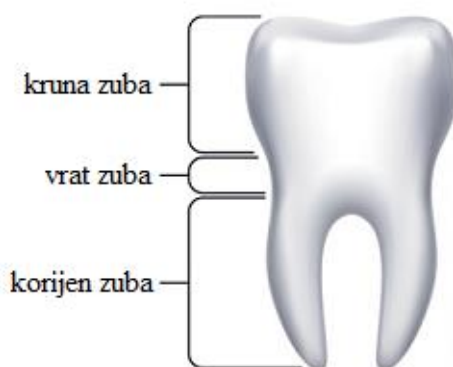


Slika 2. Obilježavanje zubi binarnim sustavom [5]

### 1.1.2. Morfologija zuba

Svaki zub može se podijeliti na 3 morfološke cjeline: krunu, vrat ili cerviks i korijen zuba (slika 3). Kruna zuba može biti anatomska ili klinička. Anatomska kruna je u potpunosti prekrivena caklinom, a dijelovi su joj djelomično prekriveni desnima, te nije u potpunosti vidljiva. Klinička kruna označava vidljivi dio zuba, te se ona može, ali se u pravilu ne preklapa s anatomskom. Vrat ili cerviks zuba je suženje između krune i korijena zuba, te je na tome djelu granica cakline i cementa koja se naziva cervikalna crta. Korijen zuba se također dijeli na anatomske i kliničke korijen. Anatomske korijen predstavlja dio zuba u potpunosti prekriven cementom, te usađen u alveolu (zubnu jamicu). Kliničke korijen zuba je dio zuba koji se ne vidi pri pregledu zuba, te kao i kod krune, može ali i ne mora odgovarati anatomskom korijenu. Prema broju korijena zubi se još mogu podijeliti na:

- jednokorijenske zube (sjekutići, očnjaci i pretkutnjaci sa izuzetkom gornjeg prvog pretkutnjaka)
- dvokorijenske zube (gornji prvi pretkutnjak i svi donji kutnjaci)
- trokorijenske zubi (gornji kutnjaci).



**Slika 3. Morfološki dijelovi zuba [6]**

### ***1.1.3. Anatomija zuba***

Anatomski i histološki gledano zub je podijeljen na tri kalcifikatna tkiva: dentin, caklina i cement, te zubne pulpe, posebnog vezivnog tkiva (slika 4).

Dentin (lat. *substantia eburnea*) je tkivo zuba koji izgrađuje njegov najveći dio. Vidljiv je golim okom jer je pokriven djelomično prozirnom caklinom u predjelu krune i cementom u predjelu korijena zuba. U središnjem dijelu formira zubnu šupljinu u kojoj se nalazi zubna pulpa. Po sastavu je sličan kostima, soli kalcija čine ga otpornim na pritisak, a žućkaste je boje. Dentin se dijeli na primarni, sekundarni i reparacioni ili terciarni dentin. Primarni se formira prije izrastanja zuba, sekundarni nakon u tijeku razvoja zube, a reparacioni nakon traume zuba. Na taj način se dentin stvara cijeli životni vijek zuba [7].

Zubna caklina (lat. *substantia adamantina s. enamelum*) je tvrdo mineralno tkivo koje u potpunosti pokriva anatomsku krunu zuba. Najveća debljina joj je na griznoj površini zuba. Caklina je najtvrdje tkivo u organizmu, ali je zbog svoje tvrdoće izrazito krta. Ona je sa oko 97% anorganske tvari najviše mineralizirano tkivo, te ima izuzetno visoka antikorozivna i antiabrazivna svojstva. Veoma je otporna na djelovanje enzima i kiselina iz hrane ili želudca. Oštećenja ili oboljenja cakline vode k nastanku karijesa, jer dentin zuba ostaje nezaštićen naspram vanjskih čimbenika [7].

Cement (lat. *substantia ossea s. crusta petrosa*) je vezivno tkivo koje prekriva anatomske korijen zuba. Glavna funkcija mu je prihvata paradontnog ligamenta – strukture koja povezuje zub s alveolnom kosti [7].

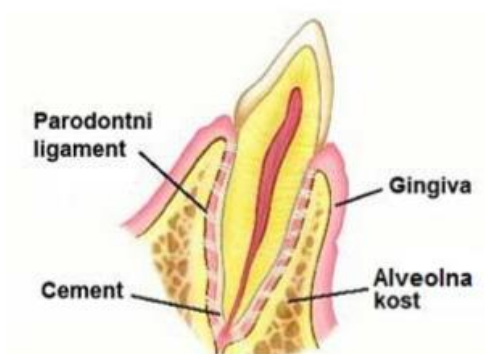
Zubna pulpa (lat. *pulpa dentis*) je meko tkivo koje se nalazi u zubnoj šupljini. Bogato je prokrvljena i inervirana. Sastoji se od elastičnih i kolagenih vlakana, krvne i limfne žile, te živčanih vlakana i stanica. Od stanica je najznačajnije spomenuti odontoblaste – stanice koje stvaraju dentin. Odontoblast povezuju dentin i pulpu; te na taj način zub je osjetljiv na bol i temperaturu [8].



Slika 4. Anatomske dijelove zuba [6]

## 1.2. Parodont zuba

Parodont ili peridont je naziv za funkcijsku cjelinu koja obuhvaća i podupire zub. Sastoji se od gingive (desni ili zubno meso) i pričvrstnog aparata kojeg čine parodontni ligament, alveolna kost i cement, vidljivi na slici 5. Glavna uloga parodonta je pričvršćivanje zuba za koštano tkivo čeljusti [10].

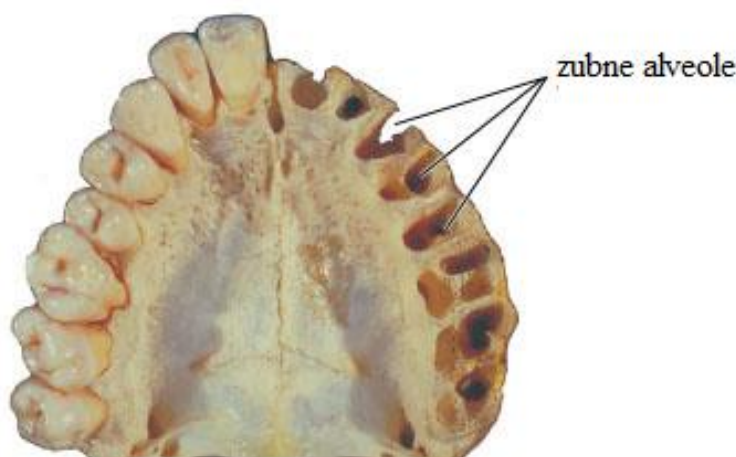


Slika 5. Građa paradonta zuba [9]

Gingiva (lat. *gingivae*) je dio sluznice usne šupljine. Više od 50% tkiva sastoji se iz kolagenih vlakana. Gingiva u potpunosti okružuje zub, pričvršćena je na njega i alveolnu kost, a svijetloružičaste je boje. Dijeli se na slobodnu gingivu, koja nije vezana za podlogu i poput kragne obavija zub, i pripojnu gingivu, koja je čvrsto vezana za podlogu [10].

Parodontni ligament (PDL) je vezivno tkivo koje uz posredstvo zubnog cementa drži zub usidren u zubnu čašicu – alveolu. Njegova bitna uloga je i ograničavanje pokreta zuba u fiziološkim granicama i ravnomjeren prijenos žvačnih sila na čeljusnu kost. Prostor u kojem se PDL nalazi, između zuba i kosti, naziva se parodontni prostor. Sastoji se od zategnutih struktura kolagenih, neelastičnih i valovitih vlakana. U njemu se, između ostaloga, nalaze krvne i limfne žile, te živci. Živci prenose bolne podražaje i osjet za toplo i hladno [10].

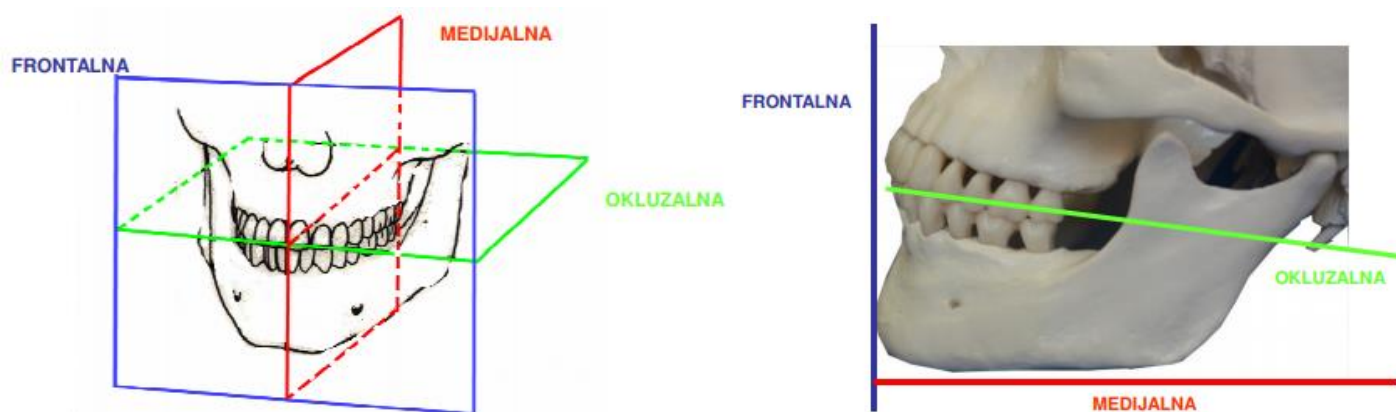
Alveola zuba ili zubna čašica (lat. *alveolus dentis*) je dio parodonta u kojoj je smješten korijen zuba. Alveole su smještene u alveolnim nastavcima gornje i donje čeljusti, a međusobno su odjeljene alveolnim pregradama, kao što se vidi na slici 6. Razvija se zajedno s razvojem zuba, a nestaje gubitkom istog. Alveola se sastoji iz kortikalnog i trabekularnog dijela. Kortikalni dio oblaže površinu alveole i tvrdi je, čvršći i gušće nabijen od trabekularnog dijela koji je elastičniji i služi za amortizaciju udara ili pokreta.



**Slika 6. Zubna alveola [11]**

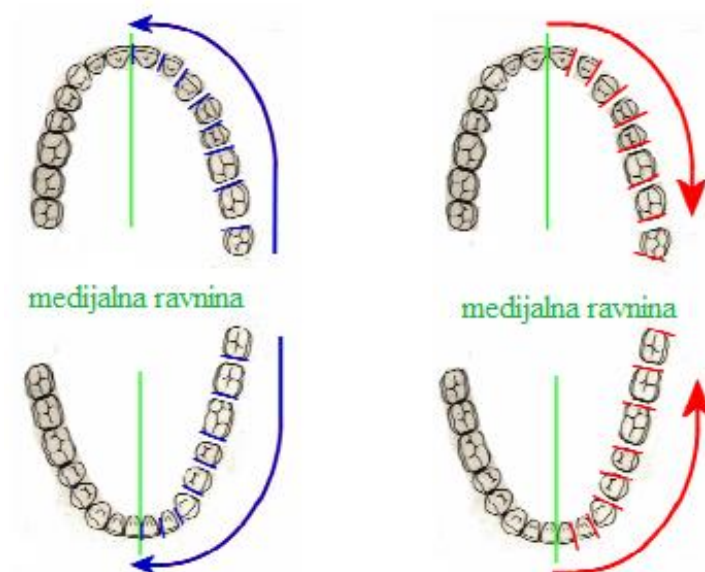
### 1.3. Biomehanika zuba

Prilikom određivanja položaja ili pomaka zuba, koriste se karakteristične zubne orijentacijske ravnine i zubni smjerovi. Postoje tri orijentacijske ravnine: medijalna, okulzalna i frontalna (slika 7). Medijalna ravnina prolazi između centralnih desnih i lijevih zuba, te dijeli čeljust na desni i lijevi dio. Okulzalna ravnina dodiruje vrhove sjekutića i gornje i donje površine kruna stražnjih zubi. Frontalna ravnina je ravnina okomita na medijalnu i horizontalnu ravninu.



Slika 7. Prikaz karakterističnih zubnih ravnina [12]

Zubne pomake u određenim smjerovima najjednostavnije je odrediti prema karakterističnim ploham zuba. Tako je distalna ploha, ploha zuba udaljena od medijalne ravnine, a mezijalna ploha, ploha zuba bliže medijalnoj ravnini (slika 8). Facijalna ploha je ploha usmjerena prema licu. Ona može biti labijalna za zube koji su u dodiru s usnama, te bukalna za zube koji su u dodiru s obrazom. Suprotno facijalnoj plohi je lingvalna ploha, gdje je površina zuba usmjerena prema jeziku. Slika 9 prikazuje okulzalne plohe zuba. Okulzalna ploha je ploha na pretkutnjacima i kutnjacima koja dodiruje odgovarajuće plohe antagonista u tijeku zatvaranja čeljusti.

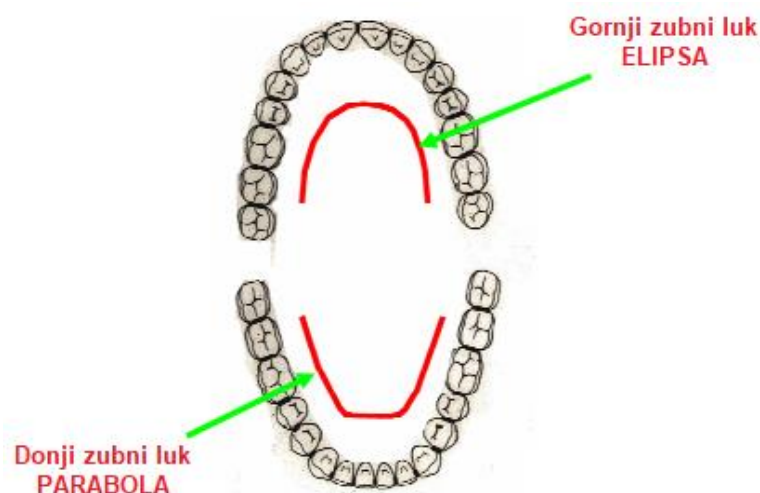


**Slika 8. Mezijalne plohe i mezijalni smjer (plavo), distalne plohe i distalni smjer (crveno) [12]**



**Slika 9. Okulzalne plohe zuba [12]**

S obzirom da se raspored i veličina gornjih i donjih zuba razlikuju, tako i zubni lukovi u gornjoj i donjoj čeljusti nisu jednaki. Ako se zubni lukovi promatraju u horizontalnoj ravnini, zubni luk gornje čeljusti nalikuje elipsi, a donje čeljusti paraboli (slika 10).



**Slika 10. Oblici zubnih lukova gornje i donje čeljusti [12]**

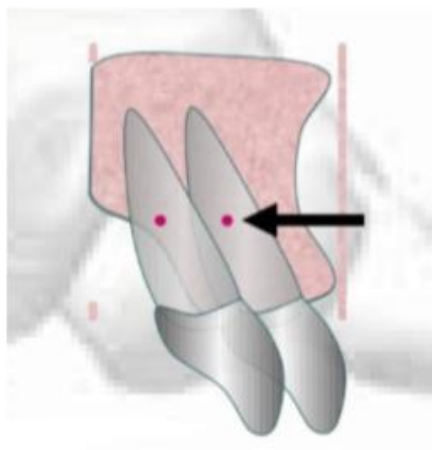
U stanju mirovanja sve sile u čeljusti i zubima su u ravnoteži ili približno jednake nuli. Mišići i tkivo obraza i usana te jezika, također potpomažu zadržavanju ovakvog stanja. Ako osoba ostane bez jednog ili više zubi dolazi do poremećaja odnosa sila između zubi; i potpune neravnoteže prilikom opterećivanja pojedinih dijelova žvačnog sustava.

### ***1.3.1. Središte otpora i središte rotacije***

Pomaci zuba mogu se najjednostavnije opisati koristeći dvije zamišljene karakteristične točke zuba – središte otpora i središte rotacije.

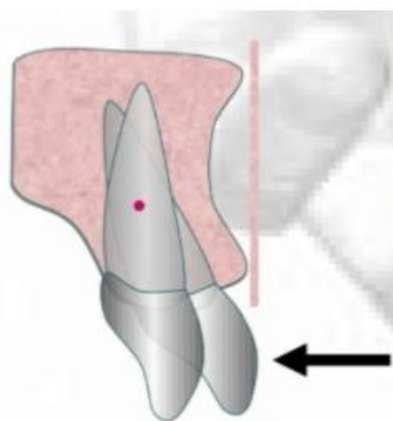
Središte otpora je točka koja se nalazi na uzdužnoj osi zuba. Ako bi pravac djelovanja rezultantne sile prolazio kroz središte otpora, tada bi ta sila izvršila čisti translacijski pomak zuba u pravcu i smjeru djelovanja sile, kao što je vidljivo na slici 11. Položaj središta otpora različit je za različite zube, a ovisi ne samo o njihovim dimenzijama i morfološkim značajkama, nego i zubnoj okolini – PDL-u, kortikalnom i trabekularnom djelu alveolne kosti itd. [13].





**Slika 11. Položaj središta otpora i translacija zuba [14]**

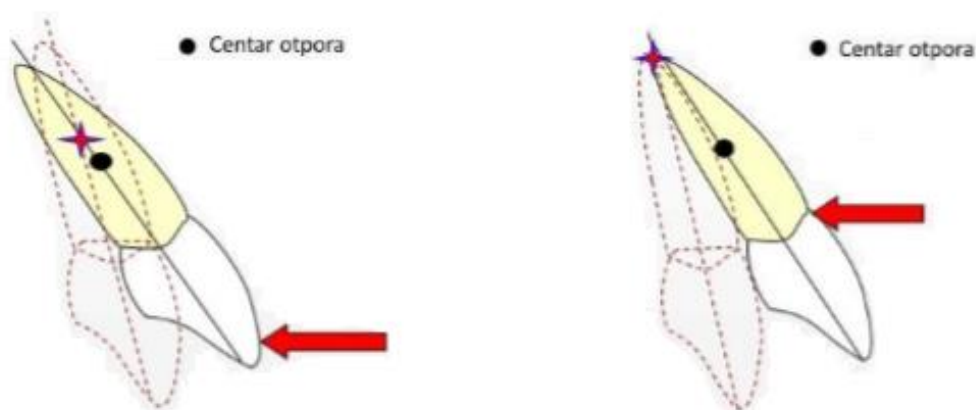
Središte rotacije je točka na uzdužnoj osi zuba koja ostaje nepomična prilikom pomaka zuba. Položaj središta rotacije ovisi o položaju središta otpora i silama i momentima koji djeluju na tijelo.



**Slika 12. Položaj središta rotacije [14]**

Pomaci koje zub može izvoditi su čista translacija, čista rotacija i naginjanje. Čista translacija zuba događa se kada je središte rotacije beskonačno udaljen od središta otpora. Čista rotacija događa se kada se središte otpora i rotacije podudaraju. Naginjanje zuba ovisi o mjestu djelovanja sile na zub, te ono može biti kontrolirano i nekontrolirano (slika 13). Kontrolirano naginjanje se događa kada sila koja djeluje na zub, zub pomiče tako da se kruna zuba rotira, a apeks – vrh korijena zuba, ostaje na istom mjestu ili se zanemarivo malo pomiče. Središte rotacije tada se nalazi u blizini apeksa. Nekontrolirano naginjanje događa se uslijed djelovanja sile, kada se kruna zuba pomiče u jednom, a korijen u drugom smjeru. Središte rotacije tada se nalazi neposredno blizu središta otpora, te zub zapravo rotira oko središta otpora.





**Slika 13. Položaj središta rotacije i otpora kod nekontroliranog (lijevo) i kontroliranog (desno) naginjanja [14]**

### **1.3.2. Ortodontski pomak zuba**

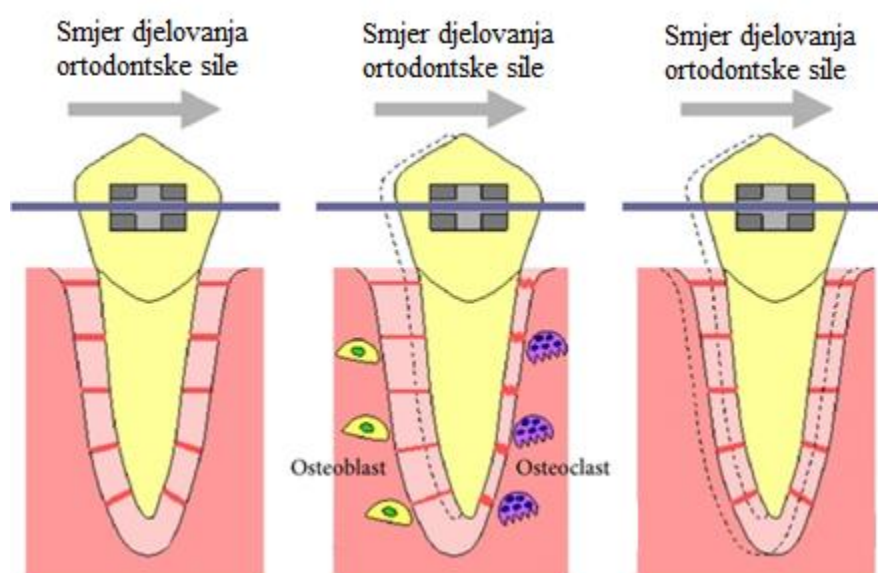
Narušena ravnoteža sila između zuba i nepravilan položaj zuba nije samo estetski nego i zdravstveni problem. Grana stomatologije koja se bavi rastom, razvojem i pravilnim održavanjem dentofacijalnog kompleksa naziva se ortodoncija. Jedan od primarnih ciljeva ortodoncije je ispravljanje nepravilnog položaja zuba i dovođenje zuba u pravilan ravnotežni položaj. Ortodoncija uključuje preventivu, dijagnostiku i liječenje svih oblika nepravilnih zubnih položaja ili zagriza.

Prilikom liječenja u velikoj se mjeri koriste ortopedski aparati koji imaju za cilj stvoriti ili prenijeti silu na pojedini zub ili više njih. Oni mogu biti fiksni ili mobilni. Mobilni aparati se izrađuju u zubnim laboratorijima i pacijent ih sam postavlja ili uklanja iz usta, dok su fiksni aparati postavljeni direktno na zube te se ne miču do kraja terapije. Fiksni aparati sastoje se od bravice koja se naljepljuje na zub i žice koja generira silu na zub.

Ortodontski aparati generiraju tzv. ortodontske sile koje djeluju na zub te uzrokuju ortodontske pomake zuba. Odgovor na ove pomake je kompleksna biokemijska reakcija koja rezultira pomakom zuba zajedno sa parodonton kroz alveolnu kost. Koštana pregradnja koja se događa u alveolnoj kosti analogna je onoj koja se događa u svim kostima ljudskog tijela koje su izložene sličnom djelovanju. Poznato je da se kosti konstantno, a uslijed djelovanja vanjskih i unutarnjih sila, razgrađuju (resorbiraju) i izgrađuju, te se na taj način dovode u stanje ravnoteže.

Koštane stanice čija je glavna uloga resorpcija koštanog tkiva nazivaju se osteoklasti, a koštane stanice koje sintetiziraju koštani matriks, te na taj način grade i razvijaju kost nazivaju se osteoblasti. Na ovaj način se površina alveolne kosti u smjeru pomaka zuba resorbira, a površina suprotno od smjera pomaka kosti izgrađuje, sprečavajući na taj način stvaranje mikropukotina.

Ortodontski pomak djeluje ne samo na zub i alveolnu kost, nego i na PDL. Pomak zuba ne ovisi samo o sili i hvatištu, te svojstvima alveolne kosti, nego i o biomehaničkim svojstvima PDL-a. S obzirom da se PDL sastoji od zategnutih kolagenih vlakana, ta vlakna se rasterećuju na tlačnoj i dodatno opterećuju na vlačnoj strani [15]. Slika 14 prikazuje djelovanje ortodontske sile na zub i njegovu okolinu.



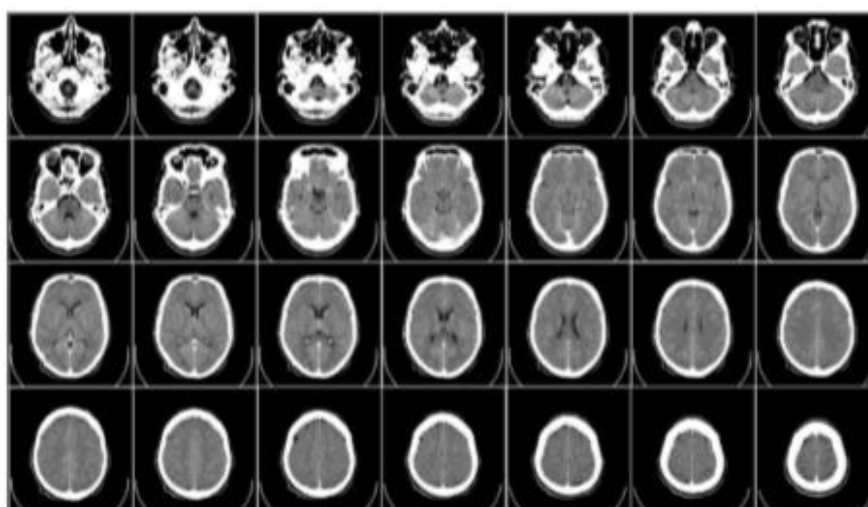
Slika 14. Prikaz djelovanja ortodontske sile na zub [16]

#### 1.4. Računalna tomografija

Tomografija je jedna od metoda snimanja i dijagnostike organa ili dijela tijela koristeći rendgenske zrake, čija je glavna značajka snimanje slojeva u nizu. Na taj način moguće je dobiti uvid u prostornu građu željenog segmenta tijela, te prikazati njegove anatomske i morfološke dijelove. Prvi uređaji koji su radili na ovome principu pojavili su se u Japanu 1946. godine, a nazvani su rotografi. Princip rada uređaja bio je sljedeći: pacijent bi ležao na stolu, s jedne njegove

strane bila bi rendgenska cijev koja bi ga ozračivala, a s druge strane film u kaseti koji bi bilježio inhibiranje rendgenskih zraka, te bi se cijev i kasete zajedno rotirali oko pacijenta. Zbog manualnog kreiranja slika na rezultate se trebalo jako dugo čekati, te su isti često bili neprecizni. Pojavom računala princip rada ovoga uređaja postaje osnova za izum računalnog tomografa [17,18].

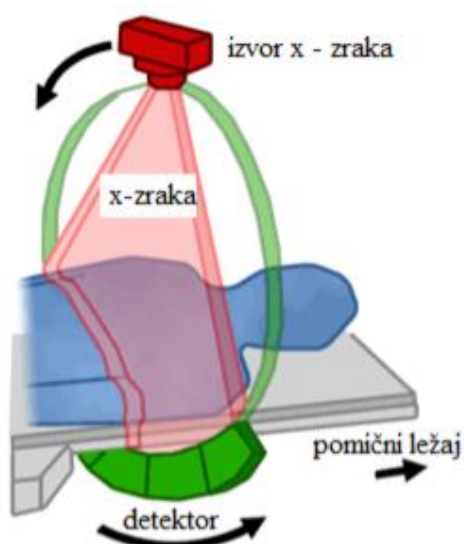
Štetno djelovanje rendgenskih zraka na zdravlje čovjeka bilo je već odavno poznato, te se početkom šezdesetih godina dvadesetog stoljeća počinje eksperimentirati s mjerenjima apsorpcije x – zraka u poprečnom presjeku tijeka, ali koristeći vrlo uski snop x – zraka. Engleski fizičar Godfrey Newbold Hounsfield u suradnji s američkim matematičarom Alan Mac Cormackom, nakon četverogodišnjeg istraživanja, 1971. godine konstruira prvi uređaj za računalnu tomografiju – CT (eng. *computed tomography*). Kako se do tada već znalo da različita tkiva i tvari u tijelu inhibiraju rendgensku zraku različitim intenzitetom, Hounsfield je zaključio da se mjerenjem slabljenja rendgenskih zraka kroz tijelo može doći do informacija o svim biološkim strukturama kroz koje zraka prođe. Kao i kod rotografa, ovakvim snimanjem dobivalo se mnoštvo slojeva koje je manualno bilo jako teško obrađivati, te je složen matematički aparat za obradu i slaganje slojeva slika razvio Mac Cormack. Informacije koje se dobiju ovakvim snimanje slažu se u slojeve dvodimenzionalnih slika, te je na taj način moguće izraditi trodimenzionalnu sliku i dobiti prostoran uvid u željeni dio tijela. Ovom uspjehu prethodio je relativno nagli razvoj računalne tehnologije, kako u hardverskom tako i u softverskom smislu. Proizvodnja i primjena prvih komercijalnih uređaja počinje 1973. godine, te se prvi uređaji koriste isključivo za glavu. Daljnjim razvojem primijenjenih tehnologija dolazi i do razvoja CT uređaja, ali osnovni princip rada ostaje nepromijenjen [18]. Na slici 15 se nalazi prikaz CT snimke glave.



Slika 15. Prikaz CT snimke glave [19]

Iako postoje različite vrste i generacije CT uređaja, svi klasični CT uređaji imaju iste osnovne komponente (slika 16 i 17):

- pomični ležaj za pacijenta koji svojim pomicanjem omogućuje skeniranje različitih slojeva poprečne ravnine
- kućište u obliku prstena u kojem se nalazi rendgenska cijev koja šalje lepezasti snop x - zraka i detektor koji ako nije duž cijelog opsega prstena, onda je nasuprot rendgenske cijevi te skupa s njom rotira oko pacijenta
- generator
- upravljačka jedinica sa monitorom.

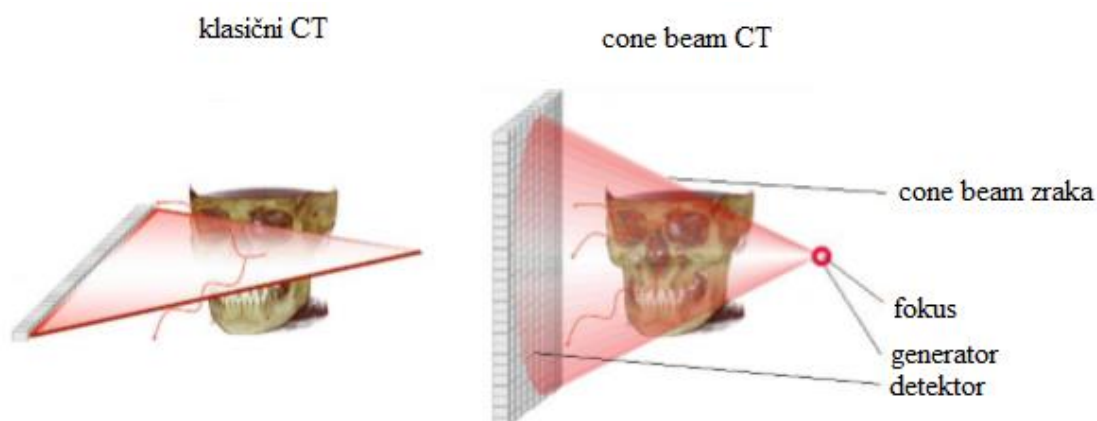


Slika 16. Shema rada CT uređaja [20]



Slika 17. Izgled današnjeg CT uređaja [21]

U dentalnoj medicini danas se najviše koristi posebna skupina CT uređaja, tzv. CBCT (eng. *cone beam computed tomography*) uređaji. Prednost ovoga uređaja je korištenje koničnog izvora zračenja, gdje se inhibiranje zraka prikuplja na dvodimenzijском detektoru (slika 18). Na ovaj način se pacijenta puno manje ozrači, s obzirom da je potrebna samo jedna rotacija koja traje manje od 30 sekundi da bi se prikupili potrebni podaci za stvaranje trodimenzionalne slike.



Slika 18. Princip rada CBCT-a [22]

#### 1.4.1. Hounsfield jedinice

Svojstvo materijala kojim se označava stupanj inhibiranja elektromagnetskog zračenja naziva se radiogustoća. U domeni rendgenske tehnologije ona označava sposobnost inhibicije rendgenskih zraka. Materijali koji u većoj mjeri inhibiraju prolaz rendgenskih zraka nazivaju se radiogusti materijali, npr. olovo, dok se materijali koji manje inhibiraju prolaz rendgenskih zraka nazivaju radioludentni, npr. voda [23].

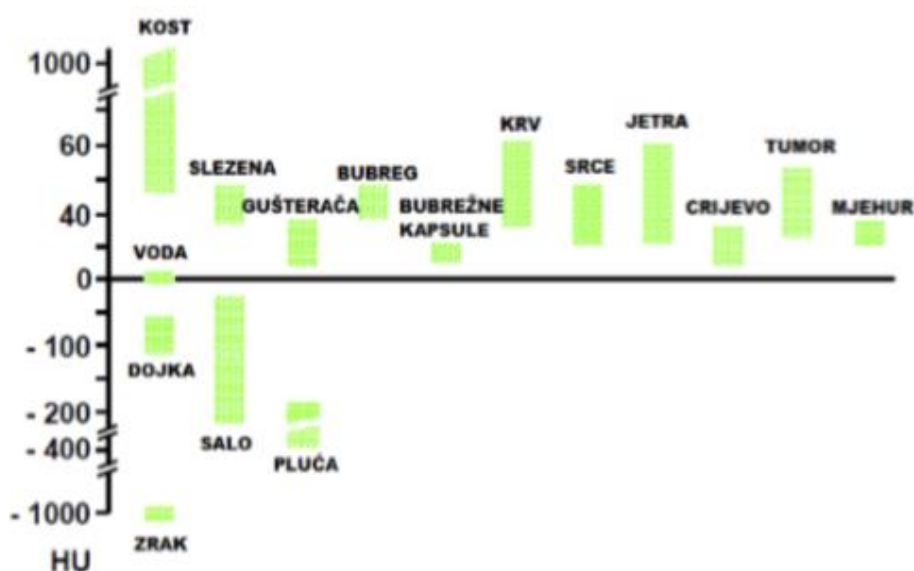
Kvantitativna mjera kojom se u sferi CT-a izražava radiogustoća su Hounsfield jedinice, nazvane prema Godfrey Newbold Hounsfieldu. Hounsfield jedinice, HU (eng. *Hounsfield units*), su prikaz transformirane vrijednosti dobivene mjerenjem inhibicije rendgenske zrake, gdje se kao referentne vrijednosti uzimaju destilirana voda i zrak. Konvencijom je određeno da se radiogustoća vode prikaže kao 0 HU, a zraka kao -1000 HU. Vrijednosti za ostale materijale računa se pomoću formule:

$$HU = 1000 \cdot \frac{\mu - \mu_{vode}}{\mu_{vode} - \mu_{zraka}} \quad (1)$$

$\mu$  predstavlja faktor prigušenja, a  $\mu_{vode}$  i  $\mu_{zraka}$  linearne faktore prigušenja vode i zraka.

HU vrijednosti za neke materijale:

- zrak = -1000
- urin = -5 do +15
- prozorsko staklo = 500
- aluminij = 2100
- vapnenac = 2800
- srebro = 17000
- zlato = 30000 [23,24].



Slika 19. Prikaz HU vrijednosti za pojedine anatomske cjeline i tkiva [25]

### 1.5. Mimics Medical 17.0

Za kreiranje modela iz CT snimki pacijenta korišten je program *Materialize Mimics 17.0*, razvijen u Leuvenu u Belgiji. Iako nudi niz korisnih bioinženjerskih programskih alata, primarni razlog njegovog nastanka je omogućavanje obrade slika, kako bi se dobio 3D model. Mimics iz velikog broja 2D slika koje mogu biti dobivene iz različitih izvora (CT, magnetska rezonanca, klasični rendgen, 3D ultrazvuk...) omogućava stvaranje 3D modela. Nakon što se model jednom kreira, on se može koristiti u različitim inženjerskim softverskim aparatima [26].

Ulazni formati kompatibilni s Mimics-om su DICOM, TIFF, JPEG, BMP i Raw. Odabir izlaznog formata ovisi o željenoj primjeni modela. Najčešće korišteni formati STL, VRML, PLY i DXF, a ako se modele žele analizirati koristeći metodu konačnih elemenata onda program omogućava i INP, CDB i MSH format. Također, mogući formati su i OUT, NAS, BDF, MPHTX [26].

Potprogram Mimics-a, koji može funkcionirati i kao zaseban program, naziva se *3 – matic*. Njegova je primarna svrha omogućavanje kreiranja i manipulacije mrežom konačnih elemenata na modelima koji su ranije kreirani u Mimicsu.

## 2. METODOLOGIJA RADA

Koristeći se programskim paketom *Mimics Medical 17.0* potrebno je izraditi model koji se sastoji iz gornjeg desnog sjekutića, te pripadnog parodontnog ligamenta (PDL) i alveolne kosti. Alveolna kost sastoji se iz kortikalnog i trabekularnog dijela, gdje svaki dio ima različita mehanička svojstva. Nakon toga potrebno je mrežu konačnih elemenata kreirati u *3-matic-u*, te model zajedno s mrežom konačnih elemenata eksportirati u format čitljiv *Abaqus*. Također potrebno je izvršiti konvergenciju modela metodom konačnih elemenata kako bi se dobio optimalan broj konačnih elemenata.

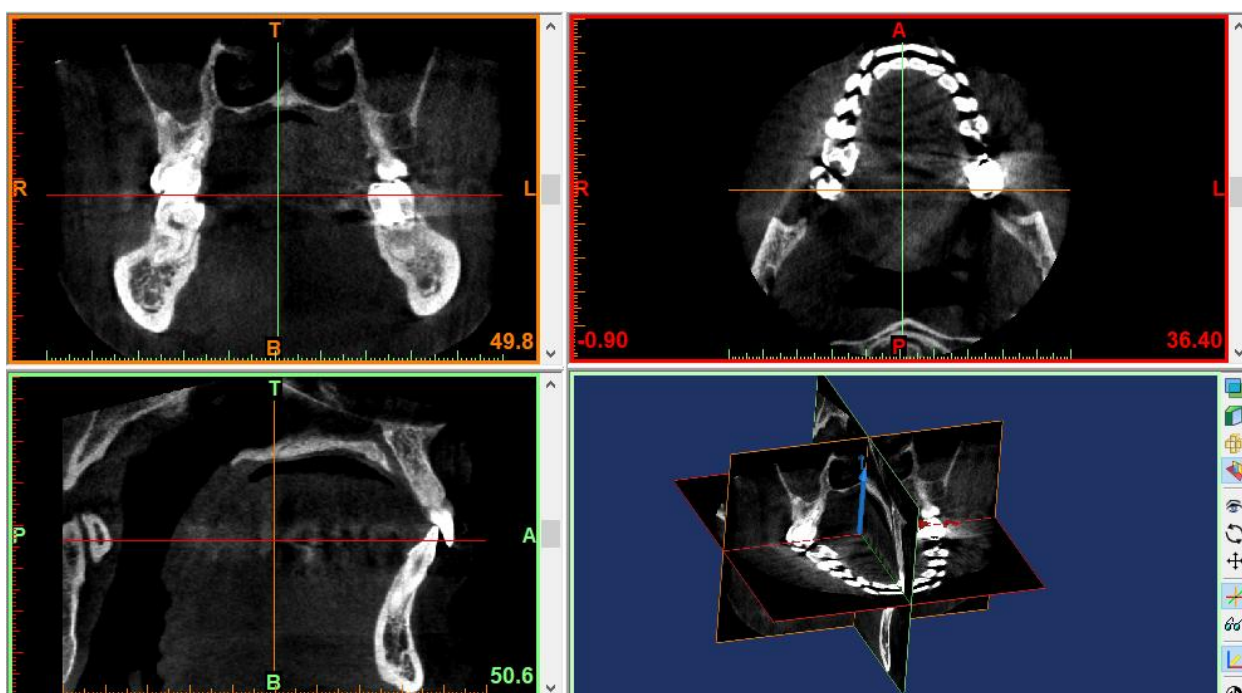
Nakon izbora modela, a kako bi se provjerio utjecaj promjene mehaničkih svojstava PDL-a na promjenu središta otpora, PDL će se podijeliti na pet regija s različitim svojstvima. Sljedeći korak je linearna i nelinearna analiza, s homogenim i heterogenim svojstvima PDL-a i promjenom odnosa postavljene sile i momenta.

### 2.1. Kreiranje maski i 3D modela iz CT snimke

Iz CT snimke glave, koristeći program *Mimics*, napravljen je model gornjeg desnog sjekutića, zajedno s PDL-om i alveolnom kosti. Alveolna kost sastoji se iz kortikalnog i trabekularnog dijela; te je tako kost podjeljena u modelu. Navedene dijelovi imaju drugačiju strukturu, posljedično i svojstva, te je o tome posebno povedeno računa prilikom kreiranja modela.

CT snimka iz koje je izdvojen željeni anatomski dio je CT snimka glave. Kako snimka cijele glave nije bila potrebna, učitana je samo onaj dio snimke na kojem se nalazi anatomski dio potreban za izradu modela. Na taj način izbjeglo se moguće preopterećivanje računalnih komponenti, poput procesora, RAM-a ili grafičke kartice. CT snimka je na slici 20 prikazana u tri ravnine, frontalnoj, horizontalnoj i medijalnoj.





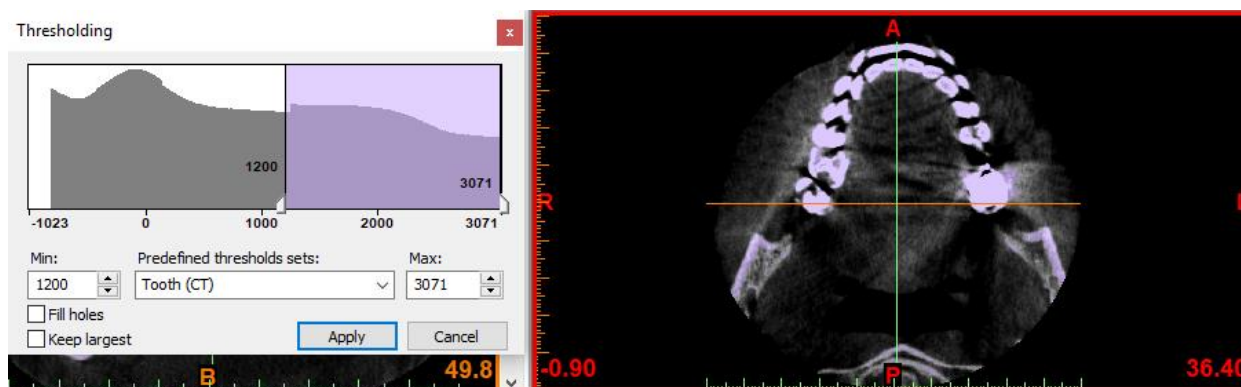
Slika 20. Prikaz CT snimke učitane u Mimics

3D objekti koji se kreiraju u Mimicsu nastaju superponiranjem željenih dijelova 2D slika, tzv. maski. Razlike između pojedinih anatomskih cjelina, tkiva i tvari Mimics prepoznaje na osnovu razlike u HU vrijednostima. U tablici 1 prikazane su vrijednosti za anatomske dijelove koji su korišteni u nastavku rada.

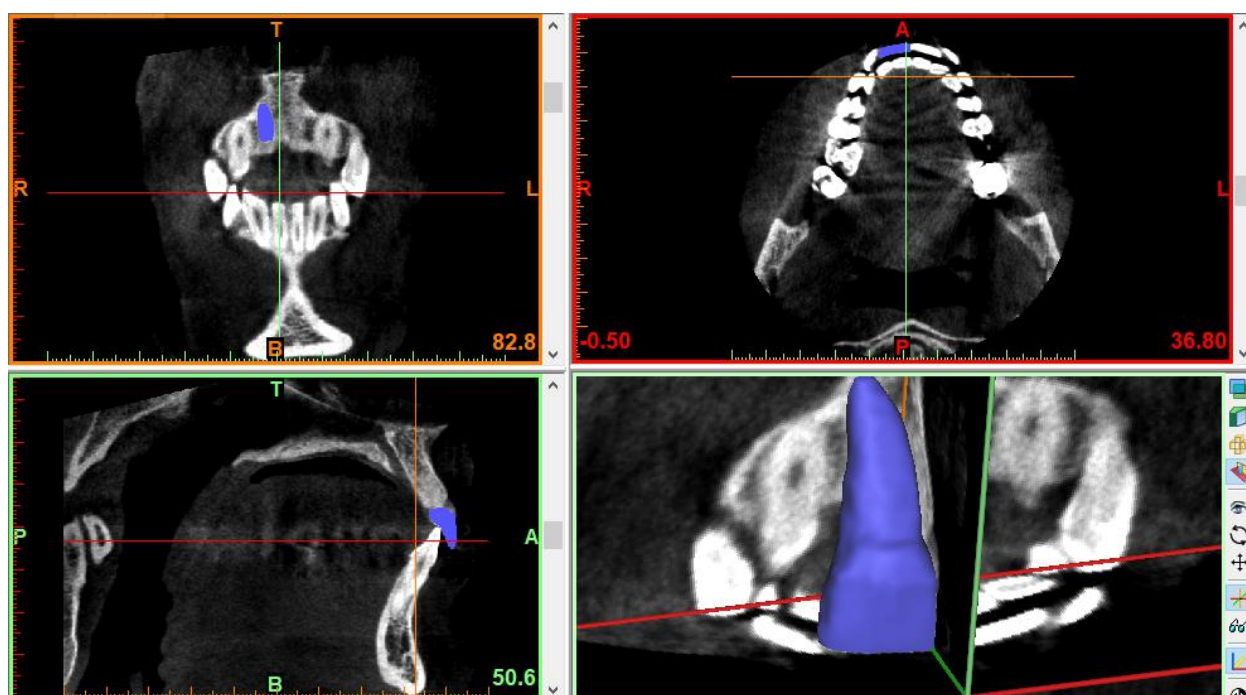
Tablica 1. HU vrijednosti željenih anatomskih dijelova

Zub	1200 – 3071
PDL	-700 – 225
Kompaktna kost	662 – 1988
Spongiozna kost	148 – 661

Prvo se pristupilo kreiranju maske zuba tako što se zadala vrijednost HU za zube (slika 21). Kako je program obilježio sve zube, značajkama „*Edit Mask*“, „*Multiple Slice Edit*“ i „*Region Growing*“ izdvojena je maska željenog zuba. Nakon toga je iz maske kreiran 3D objekt značajkom „*Calculate 3D*“ (slika 22).

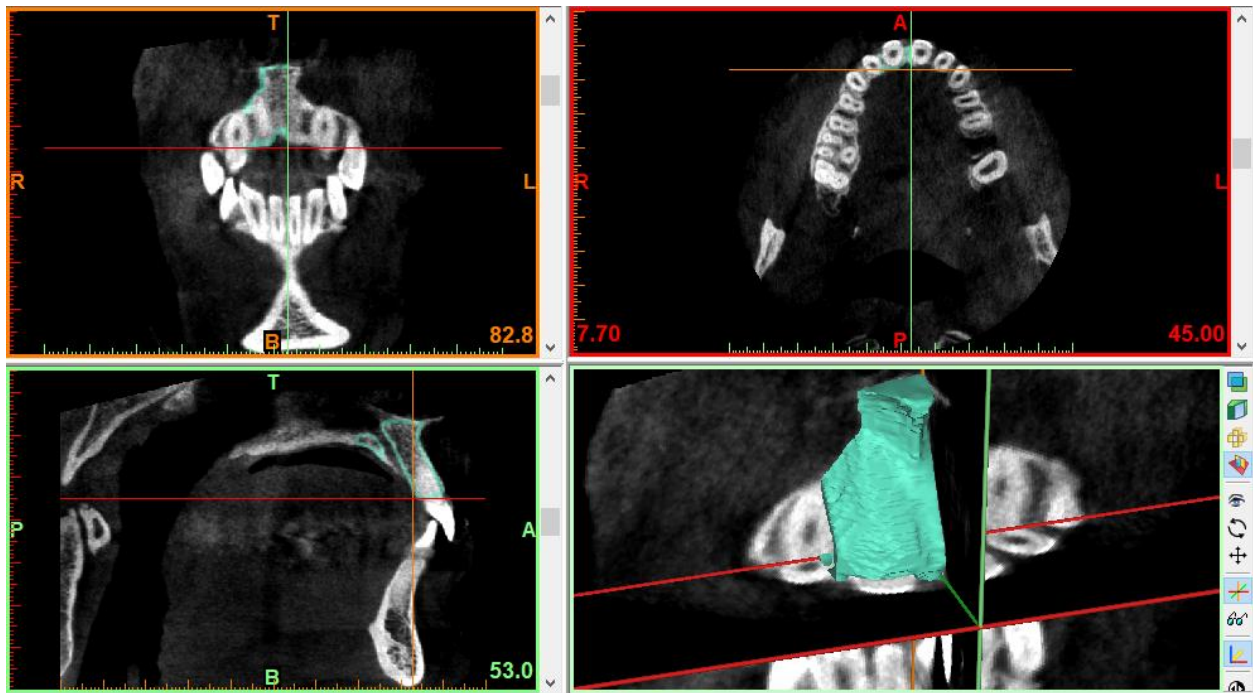


Slika 21. Prikaz odabira HU vrijednosti za zub

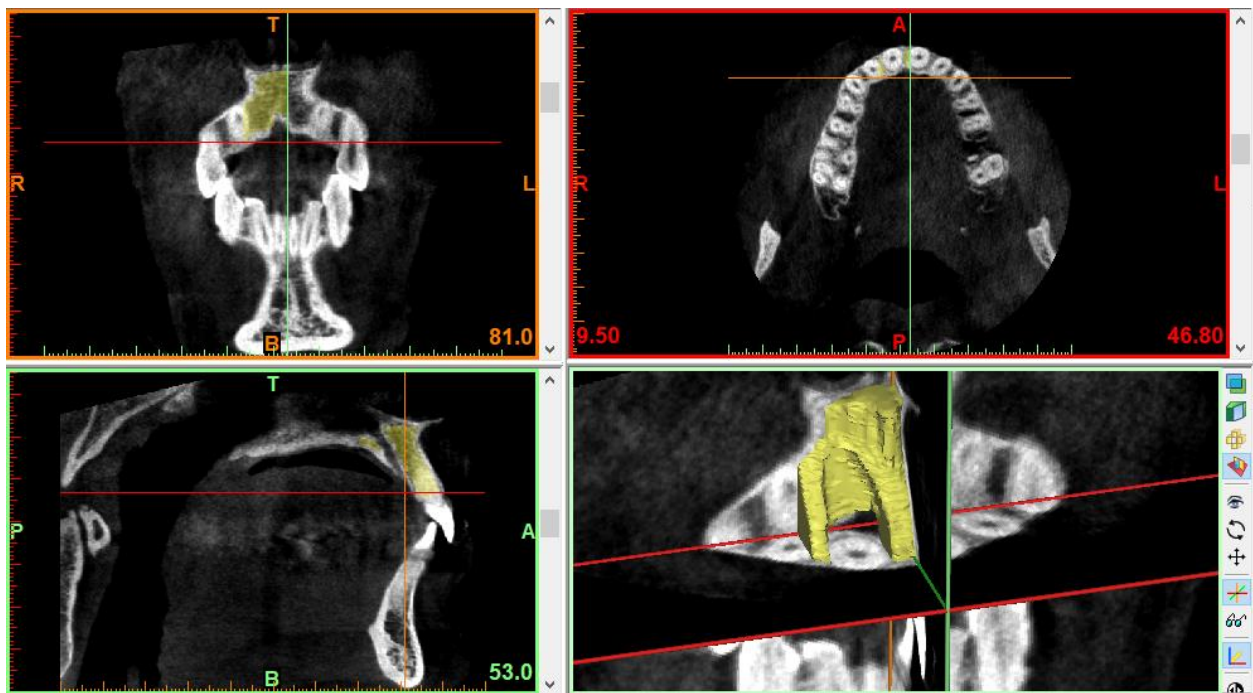


Slika 22. Prikaz maske i 3D modela zuba

Nakon toga se pristupilo kreiranju maske i 3D modela dijela alveolne kosti. Kako se kost sastoji iz dva dijela, trebalo je posebno odabrati HU vrijednosti za kortikalni (slika 23) i trabekularni (slika 24) dio. Nakon toga kosti su zasebno editirane i kreirana su dva zasebna modela.

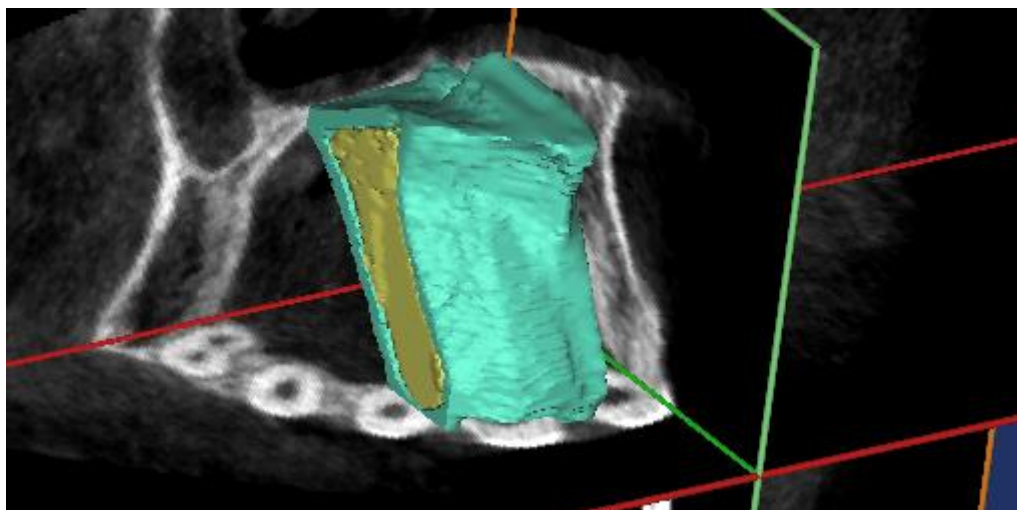


Slika 23. Prikaz maske i 3D modela kortikalnog dijela alveolne kosti



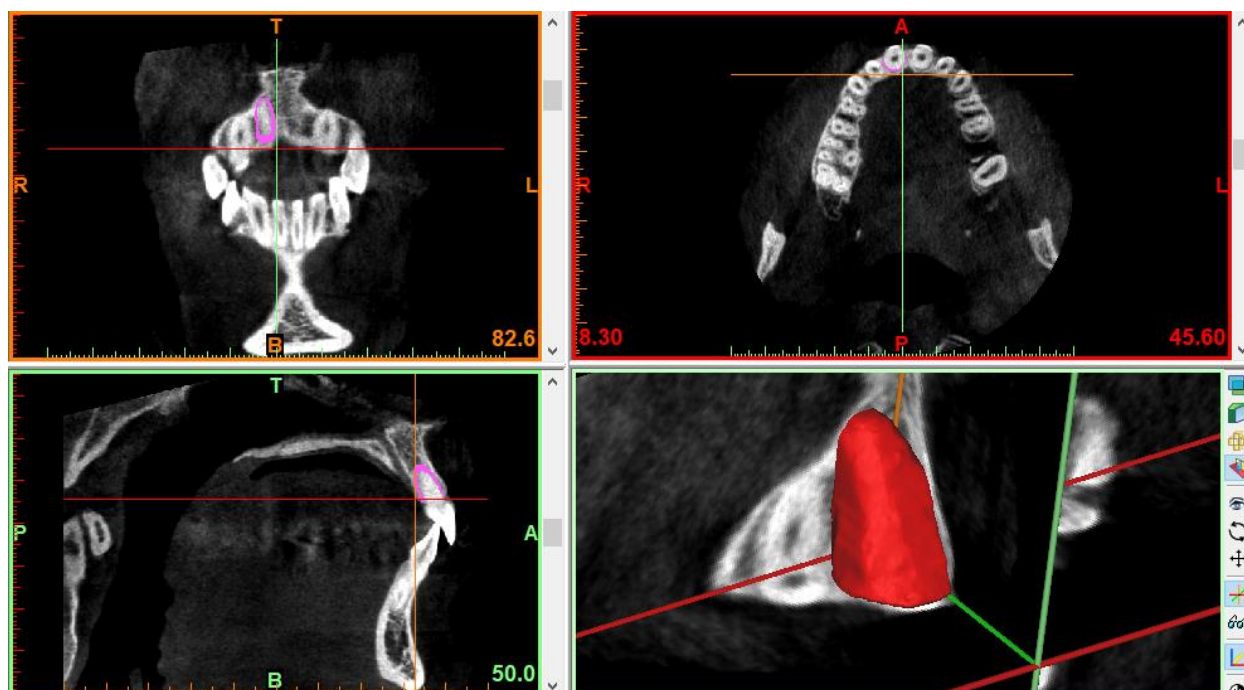
Slika 24. Prikaz maske i 3D modela trabekularnog dijela alveolne kosti





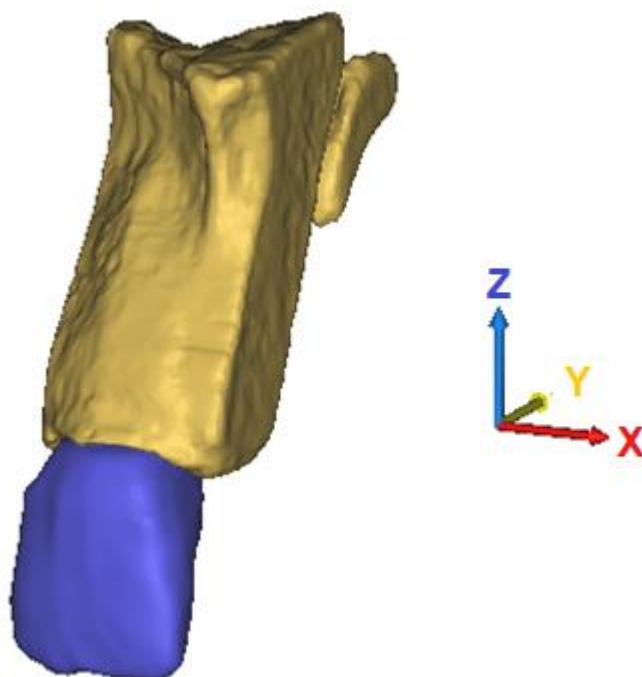
Slika 25. Prikaz 3D modela kortikalne i trabekularne kosti

Posljednji korak je bio kreiranje maske i 3D modela PDL-a. S obzirom na njegovu debljinu, 0.1 do 0.4 mm, PDL je teško vidljiv te je njegovo dobivanje bilo otežano. PDL je dobiven proširivanjem maske zuba, te oduzimanjem proširene maske od maske zuba značajkom „*Boolean Operations*“. Tako se kreirala „ljuska“ koju je nakon toga bilo jednostavno editirati i postići željeni oblik PDL-a (slika 26).

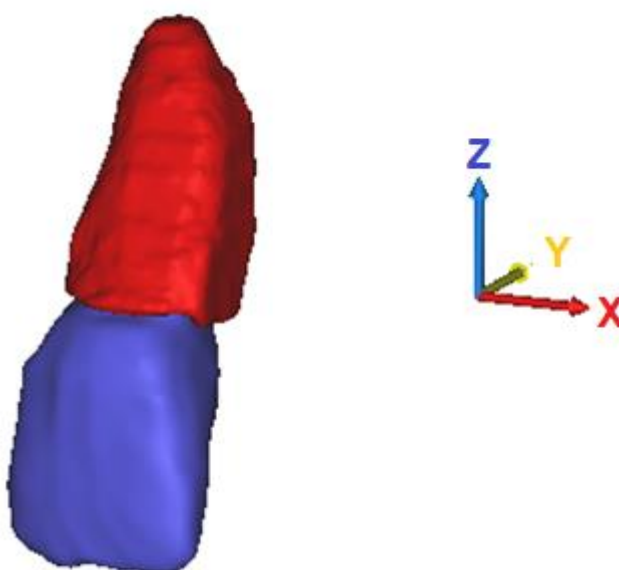


Slika 26. Prikaz maske i 3D modela PDL-a

Na ovaj način dobivene su maske i 3D modeli svih potrebnih dijelova. Nakon toga pristupilo se kreiranju mreže konačnih elemenata na željenoj anatomske cjelini koristeći program 3-matic. Slika 27 i 28 prikazuje modele učitane u 3-matic.



**Slika 27. 3D model zuba i kosti**

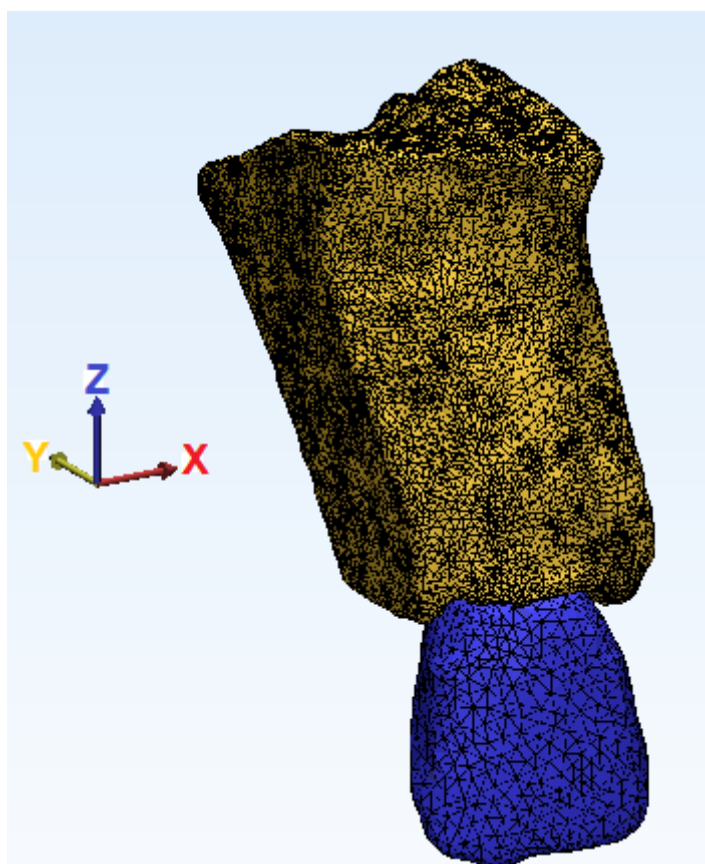


**Slika 28. 3D model zuba i PDL-a**

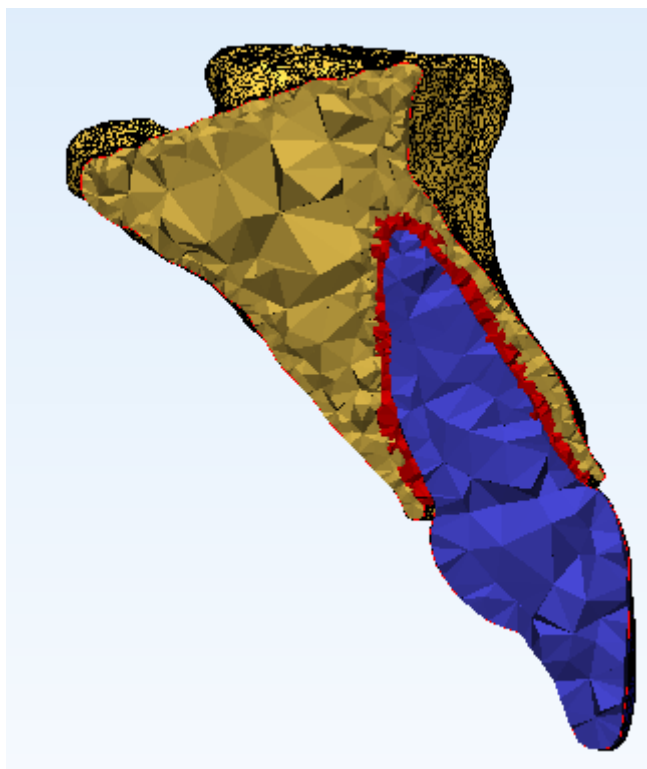
## 2.2. Kreiranje mreže konačnih elemenata

Nakon prebacivanja modela iz Mimics-a u 3-matic kreirala se mreža konačnih elemenata. Prilikom prebacivanja 3D modela događa se da se pojedini dijelovi modela preklope. Preklapanje dijelova modela je riješeno korištenjem značajke „*Boolean Subtraction*“, čime je dobivena konačna geometrija svih 3D objekata.

Mreža konačnih elemenata kreira se iz dva koraka. U prvom koraku kreira se mreža trokutastih elemenata samo na površini (slika 29). Na taj način dobije se ljuska, koja se nakon toga popuni s 3D elementima. Postavljanje i manipulacija mrežom konačnih elemenata izvršava se značajkom „*Auto Remesh*“. Nakon toga se značajkom „*Create Volume Mesh*“ kreira mreža konačnih elemenata za unutrašnjost 3D objekta.



Slika 29. Prikaz mreže konačnih elemenata na površini 3D modela

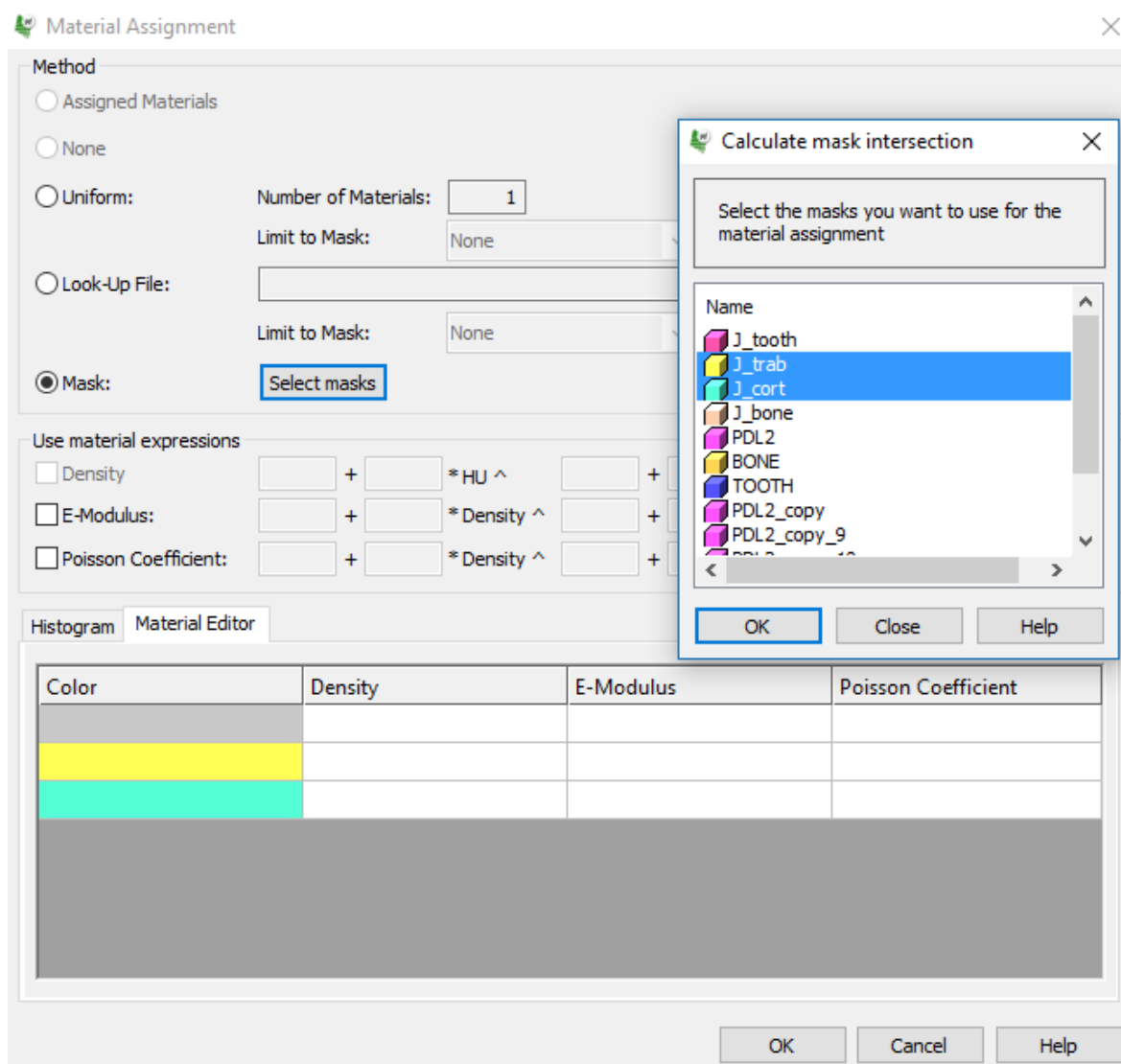


**Slika 30. Prikaz konačnih elemenata unutar 3D modela**

### **2.3. Dodjeljivanje materijalnih svojstava modelima**

Nakon što je mreža kreirana u 3-maticu, modeli se ponovo uvoze u Mimics. Razlog ovoga prebacivanja je dodavanje materijalnih svojstava modelima i izvoz u željenom formatu. Iako se i Youngov modul i Poissonov faktor mogu unijeti u Mimicsu, Abaqus te podatke ne prepoznaje, te ih je potrebno upisati ponovo. Abaqus može očitati dijelove modela koji su prethodno pomoću maski podijeljeni u Mimicsu te ih postavlja u različite setove što olakšava kasnije dodjeljivanje materijalnih svojstava modelu. Slika 31 prikazuje dodjeljivanje materijala mreži 3D elemenata prema maskama.

Ovo je izrazito važno kod alveolne kosti, s obzirom da se ona sastoji od kortikalnog i trabekularnog dijela, a u modelu je prikazana kao cjelina, te bi odjeljivanje tih dijelova u Abaqusu bilo otežano i vrlo neprecizno.



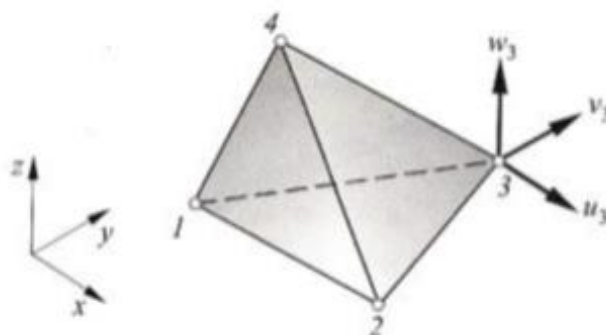
Slika 31. Dodjeljivanje materijala mreži 3D elemenata prema maskama

## 2.4. Tetraedarski elementi drugog reda

Za analizu opterećenja koristili su se tetraedarski elementi višeg reda. Najjednostavniji element za prostornu analizu je osnovni tetraedarski konačni element kojeg karakterizira dvanaest stupnjeva slobode i četiri čvora (slika 32). Čvorovi se nalaze u vrhu tetraedra s po tri komponente pomaka u pravcu Kartezijevih koordinatnih osi. Stupnjevi slobode su komponente pomaka u čvorovima:

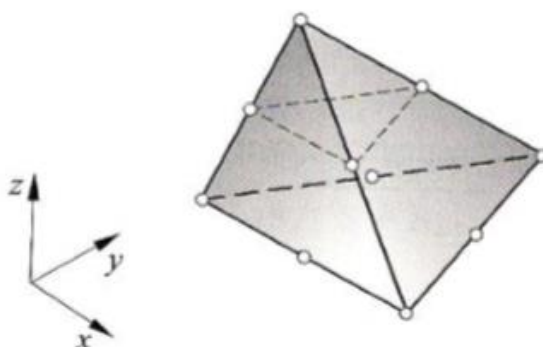
$$\mathbf{v}^T = [u_1 \ v_1 \ w_1 \ u_2 \ v_2 \ w_2 \ u_3 \ v_3 \ w_3 \ u_4 \ v_4 \ w_4] \quad (2)$$





Slika 32. Osnovni tetraedarski element [27]

Tetraedarski elementi drugog reda izvode se dodavanjem čvorova osnovnom tetraedarskom elementu (slika 33). Pritom je poželjno da polinomi funkcija pomaka budu potpuni. Tetraedarski elementi drugog reda imaju tako deset čvorova i trideset stupnjeva slobode [27].



Slika 33. Tetraedarski element drugog reda [27]

## 2.5. Konvergencija rješenja

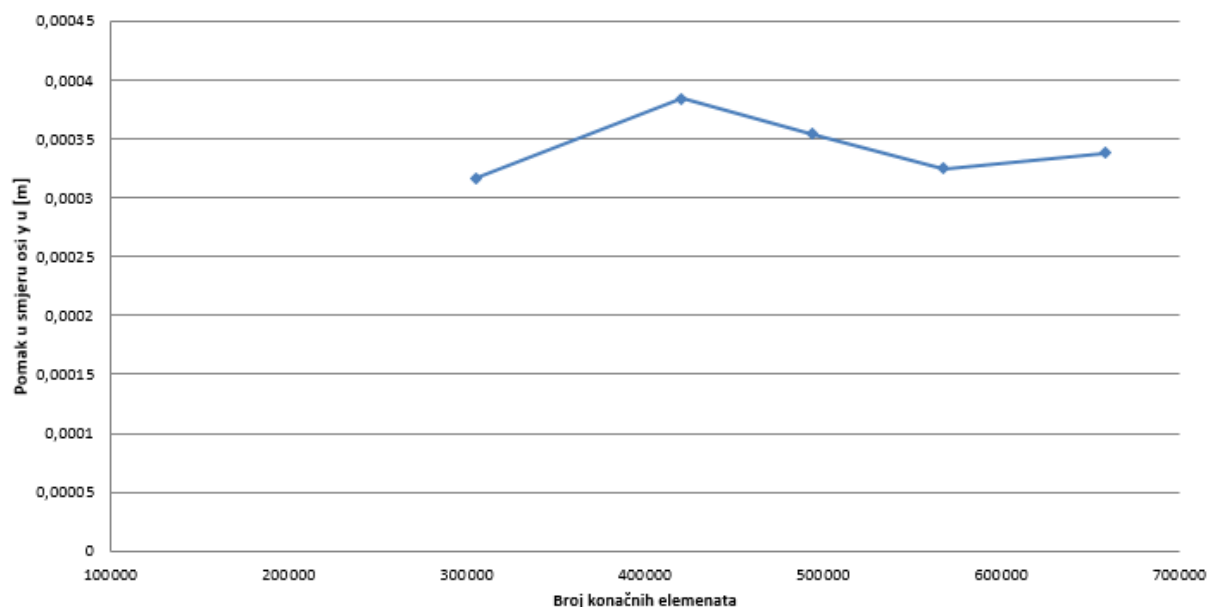
Prilikom proračuna metodom konačnih elemenata stvarni fizikalni problem se zamjenjuje proračunskim modelom, s određenim brojem konačnih elemenata. Cilj je da rješenja budu što bliža stvarnim vrijednostima. Približavanje točnim vrijednostima se događa usitnjavanjem mreže konačnih elemenata, tj. povećavanjem broja konačnih elemenata. Pri tome treba povesti računa da ako se uzme model s premalo elemenata, analiza neće biti dovoljno točna, a ako se uzme model s prevelikim brojem elemenata, računalne komponente poput RAM-a i procesora bit će

preopterećene, te će se analiza izvršavati predugo. Zbog toga se prije proračuna pristupilo izboru modela s optimalnim brojem elemenata. U 3-maticu se modelima proglašivala mreža konačnih elemenata, nakon toga su im se u Mimicsu dodavala materijalna svojstva, te se izvršavala analiza. Materijalna izotropna svojstva iz tablice 2 dodijeljena su konačnim elementima, te su analize izvršene kao linearno elastične.

**Tablica 2. Mehanička svojstva materijala modela**

	$E$ [MPa]	$\nu$
Zub	20 000	0,15
PDL	0,68	0,49
Kortikalna kost	13 800	0,26
Trabekularna kost	345	0,38

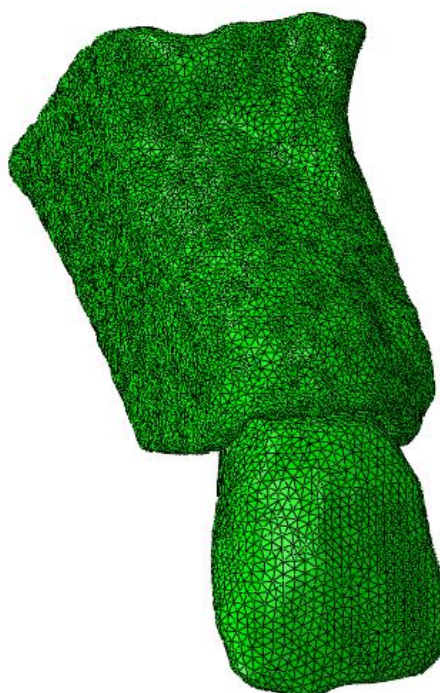
Napravljeno je pet analiza, te se pratilo kada pomak počinje konvergirati prema nekoj vrijednosti. Ustanovljeno je da se razlika pomaka modela sa 494 258 elemenata i modela sa 658131 elemenata razlikuju za oko 4% (slika 34), te je model sa 494 258 elemenata izabran kao reprezentativni model koji se koristio za sve ostale analize.



**Slika 34. Konvergencija rezultata pomaka u ovisnosti o broju konačnih elemenata**

Tablica 3. Prikaz broja elemenata i čvorova odabranog modela

MODEL	BROJ KONAČNIH ELEMENTATA	BROJ ČVOROVA
Zub	105 878	18 358
PDL	48 734	11 856
Kost	339 646	66 344
<b>UKUPNO</b>	<b>494 258</b>	<b>96 558</b>



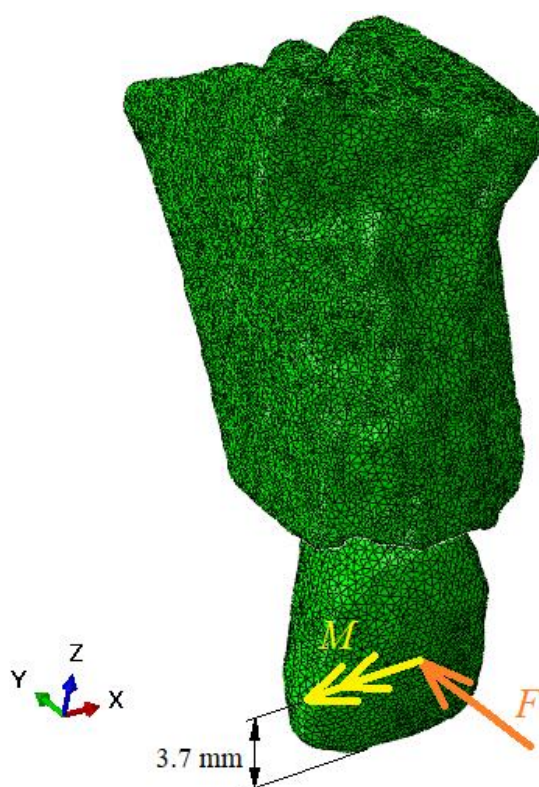
Slika 35. Prikaz mreže konačnih elemenata odabranog modela

## 2.6. Rubni uvjeti

Zub i kost su kroz sve analize homogene i izotropne, s konstantnim materijalnim svojstvima, dok je PDL u prvom dijelu imao uniformna svojstva, a u drugom je podijeljen na pet regija, gdje su svojstva i dalje izotropna, ali različita po regijama. Sve analize su provedene kao linearno elastične i nelinearne.

Nakon što su svi modeli uvezeni u program koristeći modul „*Interaction*“, kreirana je veza između pojedinih modela. Korišten je rubni uvjet kontakta „*Tie*“ kako bi se povezali pojedini dijelovi modela koji imaju zasebne mreže konačnih elemenata. Ovakav kontakti uvjet omogućio je povezivanje mreže konačnih elemenata pojedinih dijelova modela.

Zub je opterećen konstantnom silom  $F$  i momentom  $M$ , te oni simuliraju ortodontsku silu koja se javlja prilikom nošenja bravice fiksnog aparata. Sila je postavljena u smjeru osi  $Y$ , a moment oko osi  $X$ , što je i prikazano na slici 36. Moment i sila djeluju na istom mjestu, 3.7 mm od ruba krune zuba, na njegovoj medijalnoj ravni. Iznos momenta je konstantan i iznosi -5  $Nmm$ , dok je sila također konstantna, ali joj je mijenjan iznos u analizama, te iznosi 1, 3 i 5  $N$ .



Slika 36. Prikaz položaja hvatišta sile i momenta

Modelu je onemogućen pomak kosti u smjeru  $X$ ,  $Y$  i  $Z$  osi duž ruba kosti, kao što je vidljivo na slici 37.



Slika 37. Prikaz rubnih uvjeta

### 2.6.1. Analize sa homogenim PDL-om

Svim modelima dodijeljena su izotropna materijalna svojstva; te su analize izvršene kao linearno elastične i nelinearne. U ovom dijelu analize PDL je homogen, tj. po cijelom volumenu ima konstantna svojstva. Analize su izvršene kao linearno elastične i nelinearne.

**Tablica 4. Mehanička svojstva materijala modela s homogenim PDL-om**

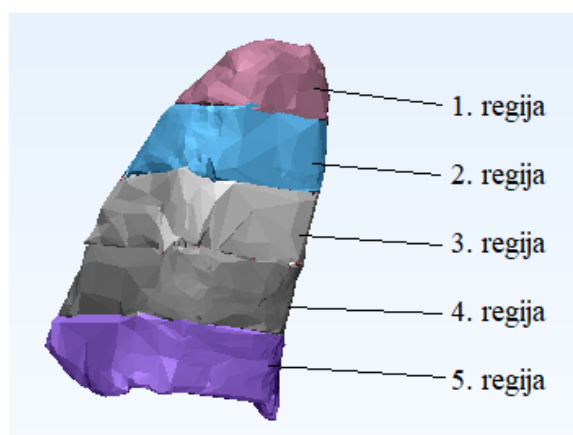
	$E$ [MPa]	$\nu$
Zub	20 000	0,15
PDL	0,68	0,49
Kortikalna kost	13 800	0,26
Trabekularna kost	345	0,38

### 2.6.2. Analize s heterogenim PDL-om

Svim modelima dodijeljena su izotropna materijalna svojstva. Alveolna kost se sastoji iz dva dijela, trabekularnog i kortikalnog te svaki dio ima pripadajuća materijalna svojstva. PDL je heterogen i sastoji se iz pet regija gdje svaka ima različita mehanička svojstva. Podjela regija vidljiva je na slici 38. Analize su izvršene kao linearno elastične i nelinearne. Vrijednosti mehaničkih svojstava dobivene su iz literature [28].

**Tablica 5. Mehanička svojstva materijala modela s heterogenim PDL-om**

	$E$ [MPa]	$\nu$
Zub	20 000	0,15
Kortikalna kost	13 800	0,26
Trabekularna kost	345	0,38
PDL – 1. regija	0,303	0,45
PDL – 2. regija	0,208	0,45
PDL – 3. regija	0,143	0,45
PDL – 4. regija	0,179	0,45
PDL – 5. regija	0,250	0,45



**Slika 38. Prikaz pozicija pojedine regije na PDL-u**

### 3. REZULTATI

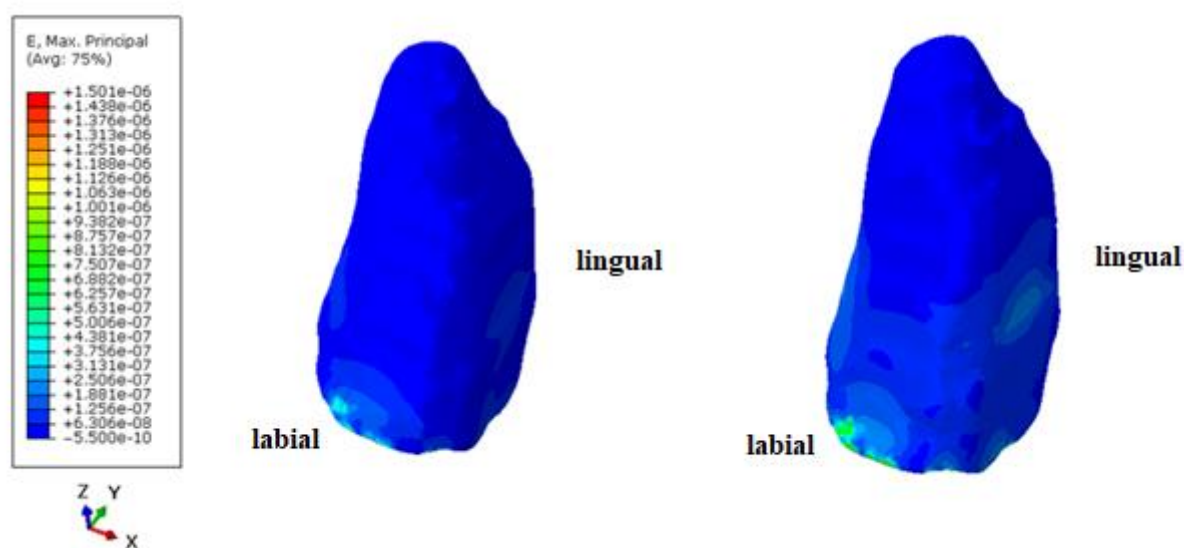
Izvršeno je dvanaest analiza s izotropnim svojstvima materijala. Od toga šest linearno elastičnih, a šest nelinearnih. U tablici 6 prikazane su kombinacije analiza, svojstva materijala PDL-a i vrijednosti sile i momenta, a u narednim poglavljima rezultati analiza. Za svaku promjenu odnosa sile i momenta promatrala se duljinska deformacija PDL-a, te utjecaj svojstva PDL-a i tipa analize na promjenu položaja središta otpora zuba. To se izvršilo tako što se na vanjskoj strani zuba, od ruba krune prema apeksu, očitali ukupni pomaci, te pomaci  $U_2$  – u smjeru osi  $Y$ . Potom su se ti podatci iskoristili da bi se nacrtali dijagrami. Dijagrami su grupirani tako da se svaka kombinacija tipa analize i svojstva PDL-a čine jedan dijagram, gdje različite krivulje predstavljaju različite vrijednosti omjera momenta i sile. Mjesto gdje se krivulje sijeku predstavlja središte otpora za taj tip analize i svojstvo PDL-a. Kako su čvorovi odabrani po vanjskoj strani zuba, zbog morfoloških značajki zuba, vidljivo je da u nekim čvorovima dolazi do većeg skoka vrijednosti pomaka.

**Tablica 6. Izvršene analize**

Redni broj analize	Tip analize	Svojstvo PDL-a	Vrijednost sile $F$ [N]	Vrijednost momenta $M$ [Nmm]
1.	Linearna	Homogen	1	-5
2.	Nelinearna	Homogen	1	-5
3.	Linearna	Homogen	3	-5
4.	Nelinearna	Homogen	3	-5
5.	Linearna	Homogen	5	-5
6.	Nelinearna	Homogen	5	-5
7.	Linearna	Heterogen	1	-5
8.	Nelinearna	Heterogen	1	-5
9.	Linearna	Heterogen	3	-5
10.	Nelinearna	Heterogen	3	-5
11.	Linearna	Heterogen	5	-5
12.	Nelinearna	Heterogen	5	-5

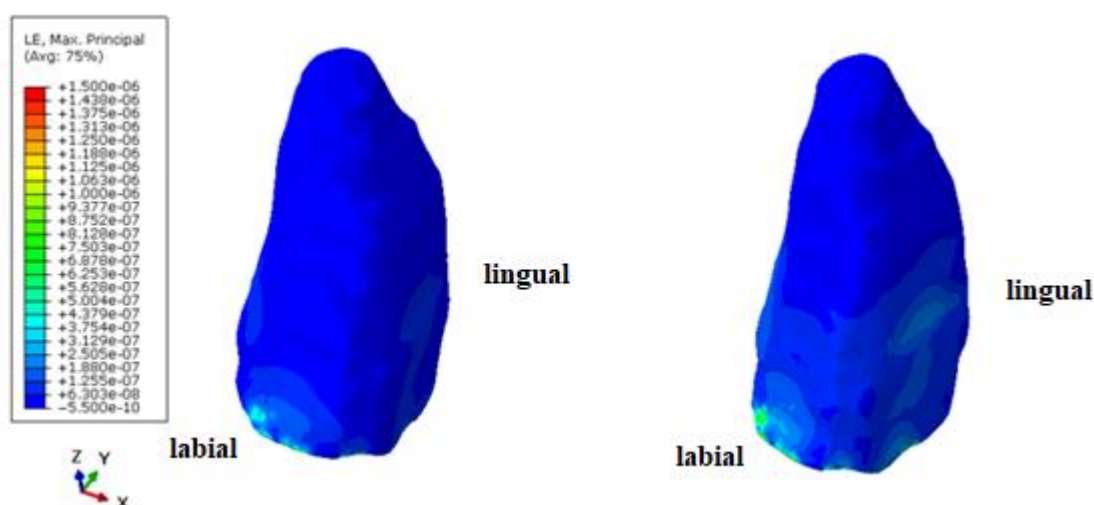


### 3.1. Deformacija PDL-a kod omjera momenta i sile $M/F = -5$



Slika 39. Raspodjela duljinskih deformacija homogenog i heterogenog PDL-a kod linearno elastične analize,  $M/F = -5$

Na slici 39 prikazana je raspodjela duljinskih deformacija homogenog i heterogenog PDL-a kod linearno elastične analize. Omjer momenta i sile iznosi  $M/F = -5$ . S obzirom da heterogeni PDL ima niže vrijednosti modula elastičnosti od homogenog, vidljiva je očekivano veća deformacija kod heterogenog PDL-a.

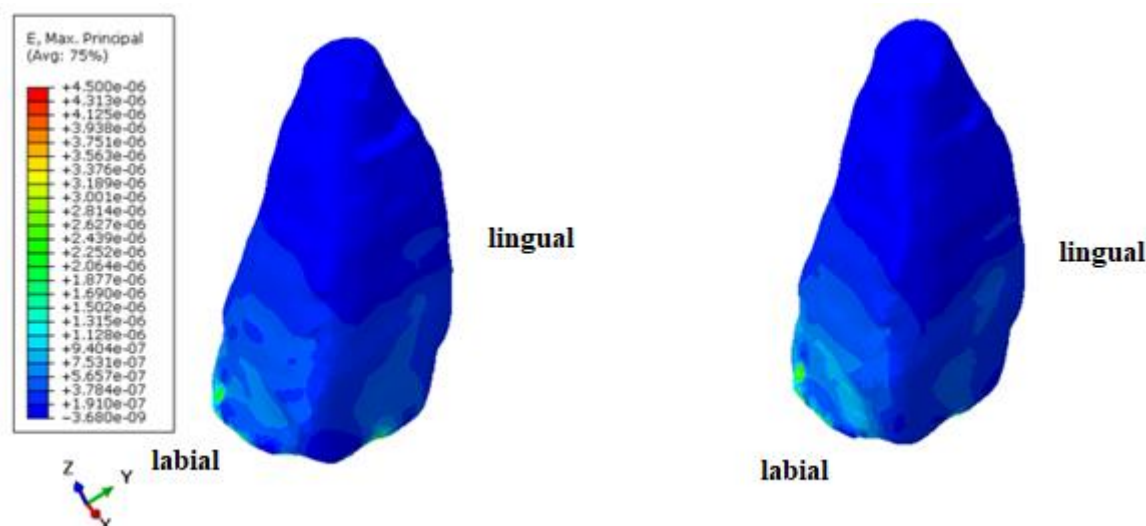


Slika 40. Raspodjela stvarnih duljinskih deformacija homogenog i heterogenog PDL-a kod nelinearne analize,  $M/F = -5$



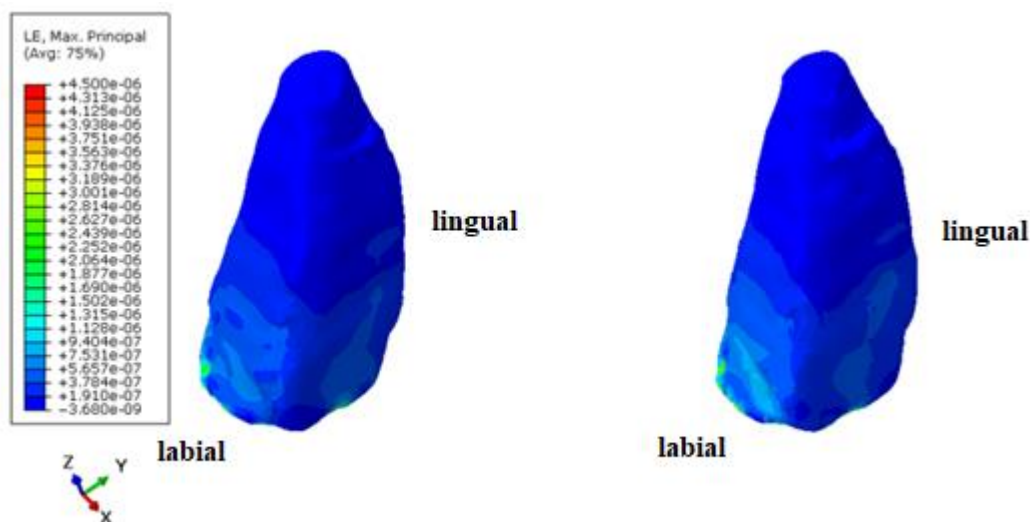
Slika 40 prikazuje raspodjelu stvarnih duljinskih deformacija homogenog i heterogenog PDL-a kod nelinearne analize. I u ovom slučaju omjer momenta i sile je  $M/F = -5$ . Heterogeni PDL ima niže vrijednosti modula elastičnosti od homogenog, pa je i ovdje vidljiva veća deformacija heterogenog PDL-a.

### 3.2. Deformacija PDL-a kod omjera momenta i sile $M/F = -5/3$



Slika 41. Raspodjela duljinskih deformacija homogenog i heterogenog PDL-a kod linearno elastične analize,  $M/F = -5/3$

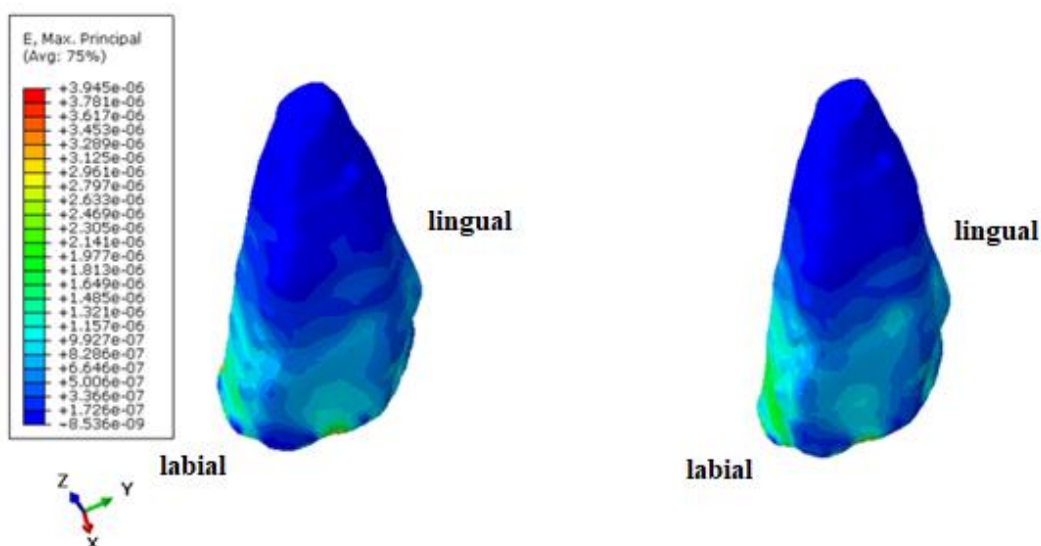
Na slici 41 prikazana je raspodjela duljinskih deformacija homogenog i heterogenog PDL-a kod linearno elastične analize. Omjer momenta i sile u ovom slučaju iznosi  $M/F = -5/3$ . Zbog razlike u mehaničkim svojstvima PDL-a i u ovome prikazu je vidljiva veća deformacija kod heterogenog PDL-a.



**Slika 42. Raspodjela stvarnih duljinskih deformacija homogenog i heterogenog PDL-a kod nelinearne analize,  $M/F = -5/3$**

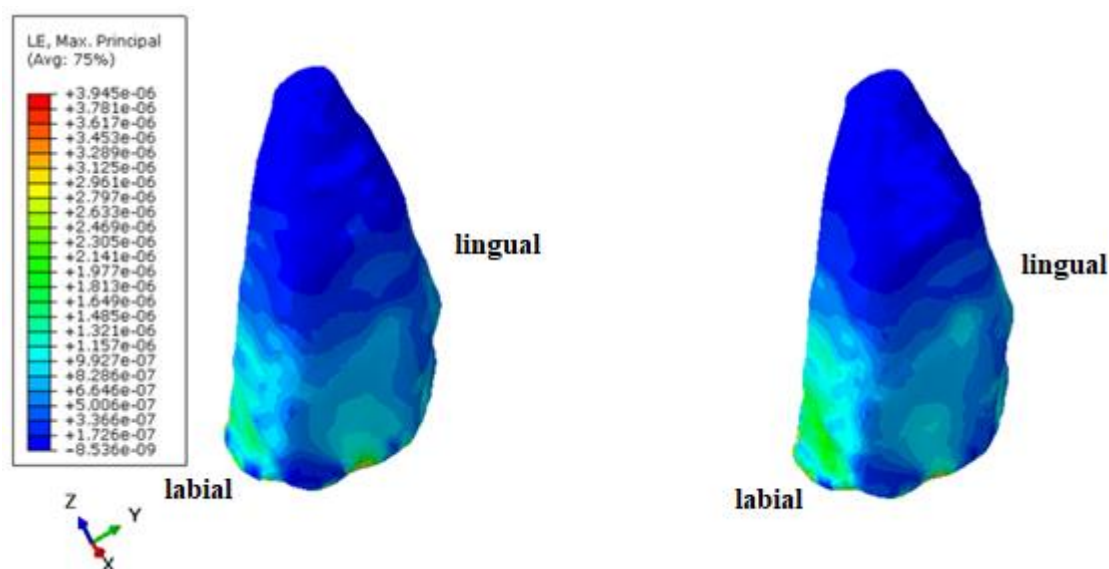
Na slici 42 prikazana je raspodjela stvarnih duljinskih deformacija homogenog i heterogenog PDL-a kod nelinearne analize, kada omjer momenta i sile iznosi  $M/F = -5/3$ . Na ovoj slici je također vidljivo da se heterogeni PDL više deformira.

### 3.3. Deformacija PDL-a kod omjera momenta i sile $M/F = -1$



**Slika 43. Raspodjela duljinskih deformacija homogenog i heterogenog PDL-a kod linearno elastične analize,  $M/F = -1$**

Na slici 43 prikazana je raspodjela duljinskih deformacija homogenog i heterogenog PDL-a kod linearno elastične analize. Omjer momenta i sile iznosi  $M/F = -1$ . Kako heterogeni PDL ima niže vrijednosti modula elastičnosti od homogenog, vidljiva je veća deformacija kod heterogenog PDL-a.

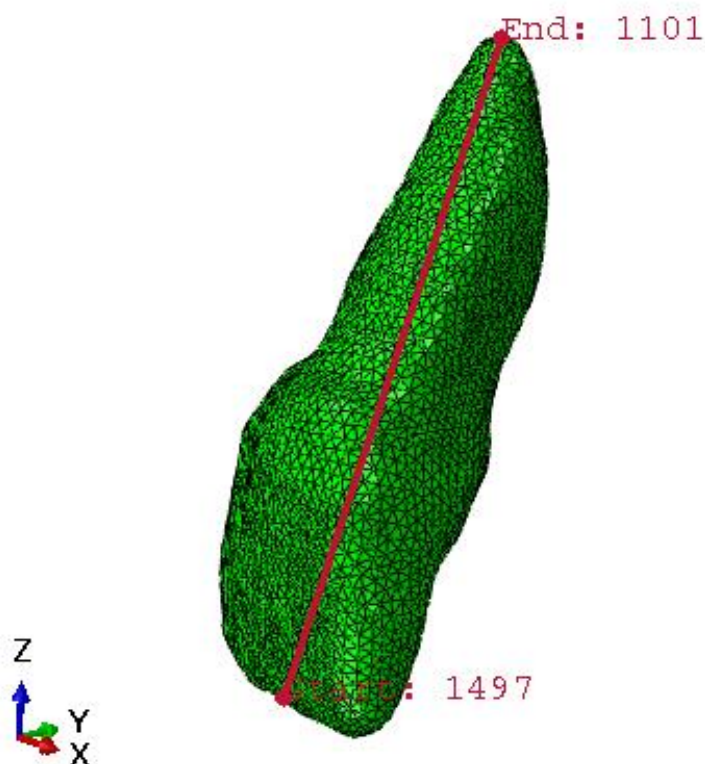


**Slika 44. Raspodjela stvarnih duljinskih deformacija homogenog i heterogenog PDL-a kod nelinearne analize,  $M/F = -1$**

Slika 44 prikazuje posljednju analizu, raspodjelu stvarnih duljinskih deformacija homogenog i heterogenog PDL-a kod nelinearne analize. Omjer momenta i sile i u ovom slučaju iznosi  $M/F = -1$ . Vidljiva je, zbog razlike u mehaničkim svojstvima, veća deformacija kod heterogenog PDL-a.

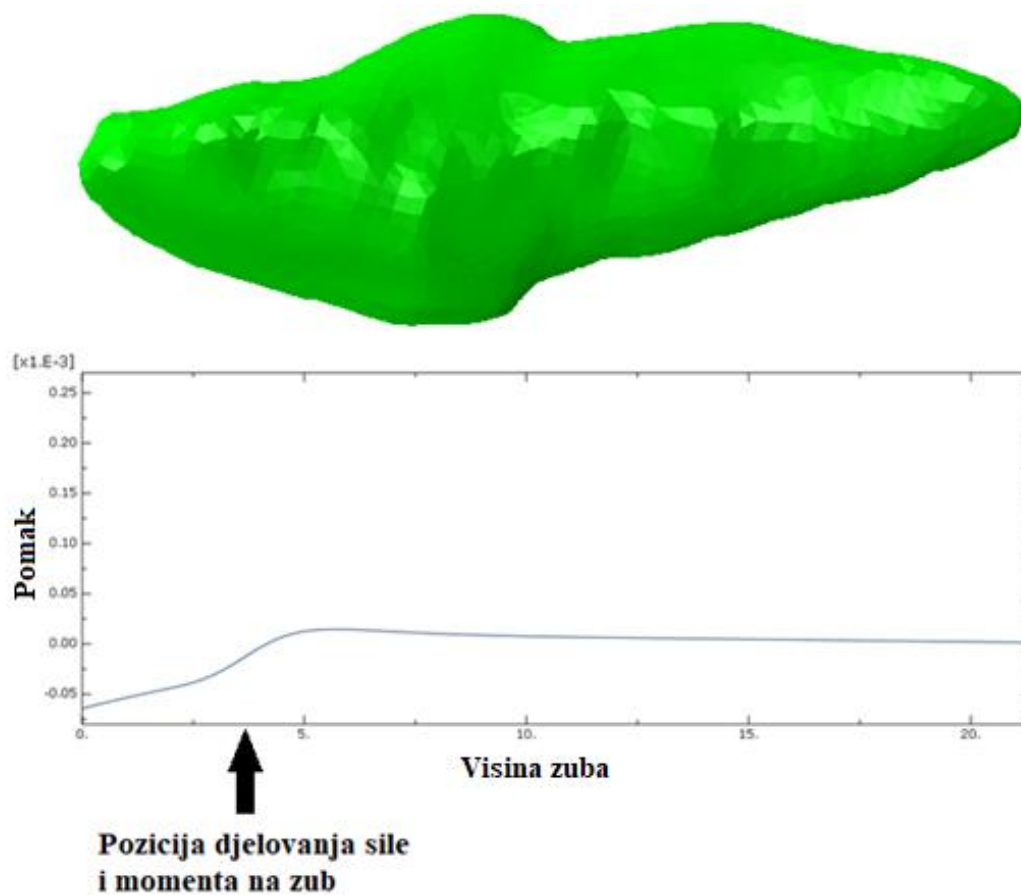
### **3.4. Postupak određivanja položaja središta otpora**

Prilikom određivanja položaja središta otpora potrebno je pronaći točku na zubu koja se neovisno o omjeru momenta i sile  $M/F$  jednako udaljila od svoje prvobitne pozicije. Nakon što su sve analize izvršene kreirana je linija koja je prolazila medijalnom ravninom zuba, a čiji se pomak pratio u odnosu na visinu zuba (slika 45). Pri tome se, da bi mjerenje bilo preciznije, vodilo računa da početna i krajnja točka zuba budu uvijek na istoj koordinati za svaku analizu.



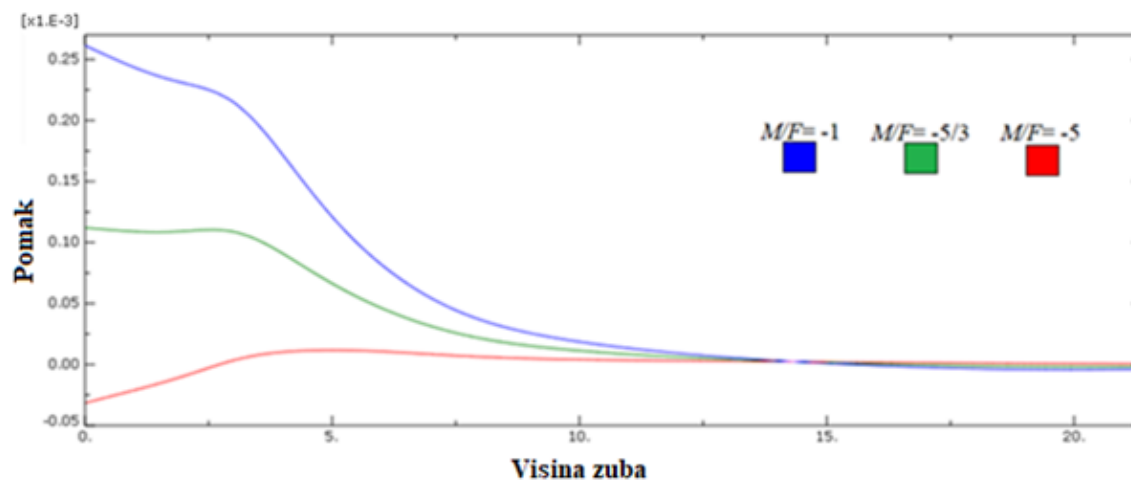
**Slika 45. Linija za praćenje pomaka zuba**

Nakon što je linija kreirana, koristeći se značajkom „XY Data“, kreiran je dijagram gdje je na osi apscise visina zuba, a na ordinati pomak u smjeru  $Y$  osi. Usporedbom krivulja dijagrama dobivena je točka gdje se dijagrami preklapaju, te je iz te točke očitao položaj središta otpora, tj. njegova udaljenost od ruba krune zuba. Na slici 46 je na gornjem dijelu prikaz zuba iz bokocrta ( $ZY$  ravnina), a na donjem dijelu dijagram s krivuljom koja predstavlja pomak zuba, te poziciju djelovanja sile i momenta na zub.



Slika 46. Prikaz zuba, pomaka zuba i pozicije djelovanja momenta i sile

### 3.4.1. Položaj središta otpora kod linearne analize s homogenim PDL-om



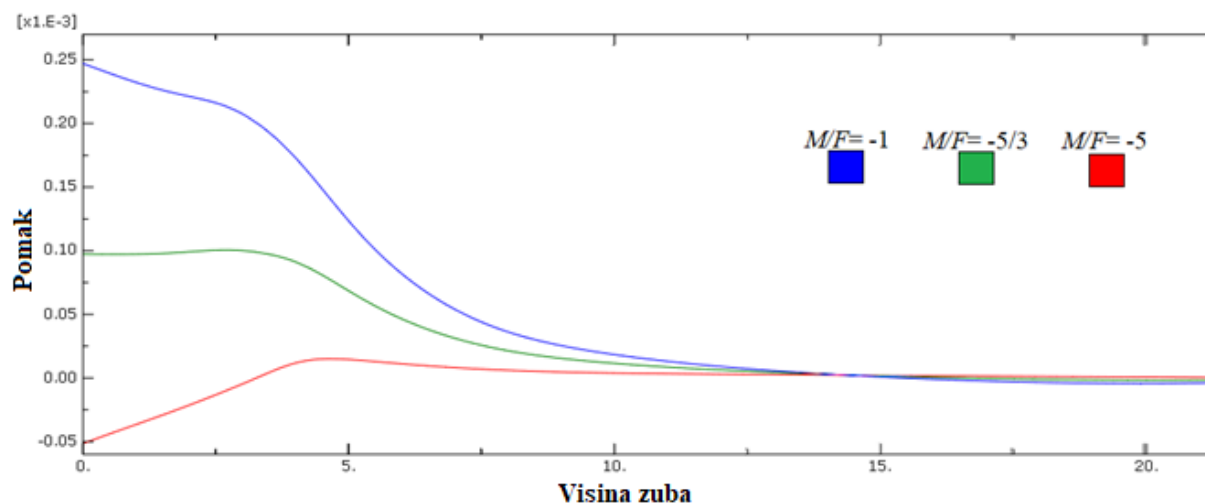
Slika 47. Krivulje pomaka kod linearne analize i homogenog PDL-a

Na slici 47 vidljivo je da je položaj središta otpora udaljen 13,5 mm od ruba krune zuba. Zbog omjer momenta i sile  $M/F = -5$ , vrh krune zuba se kod analize označene crvenom krivuljom kreće u negativnom smjeru. U tablici 7 prikazan je pomak ruba krune zuba u ovisnosti o omjeru momenta i sile.

**Tablica 7. Pomak ruba krune zuba u ovisnosti o omjeru momenta i sile, linearna analiza i homogen PDL**

Omjer momenta i sile $M/F$	Pomak ruba krune zuba $\cdot 10^{-5} [\text{mm}]$
-1	26
-5/3	11,2
-5	-3

### 3.4.2. Položaj središta otpora kod nelinearne analize s homogenim PDL-om



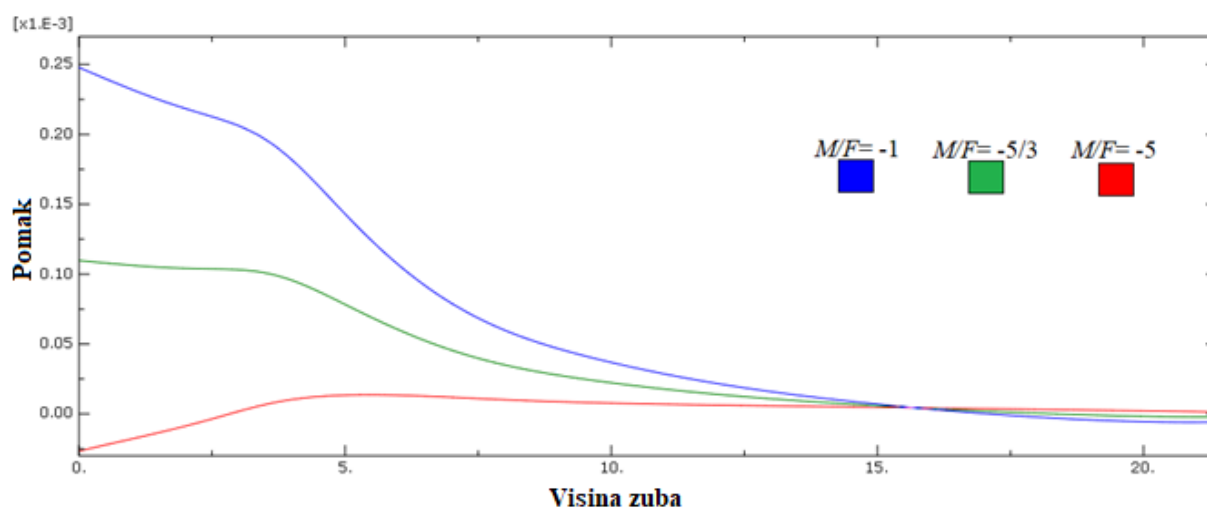
**Slika 48. Krivulje pomaka kod nelinearne analize i homogenog PDL-a**

U odnosu na prošlu analizu, položaj središta otpora je i dalje otprilike na istom mjestu, oko 13,5 mm od ruba krune zuba. Iako mala, uočljiva je promjena pomaka ruba krune u odnosu na linearnu analizu.

**Tablica 8. Pomak ruba krune zuba u ovisnosti o omjeru momenta i sile, nelinearna analiza i homogen PDL**

Omjer momenta i sile $M/F$	Pomak ruba krune zuba $\cdot 10^{-5} [\text{mm}]$
-1	24,5
-5/3	9,5
-5	-5

### 3.4.3. Položaj središta otpora kod linearne analize s heterogenim PDL-om



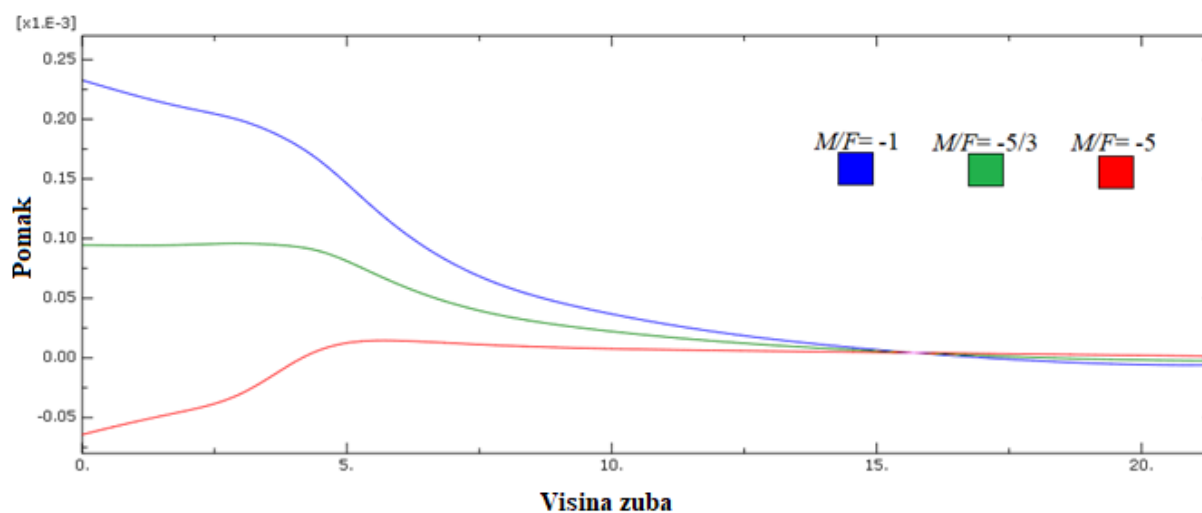
**Slika 49. Krivulje pomaka kod linearne analize i heterogenog PDL-a**

Na slici 49 vidljiva je promjena položaja središta otpora naspram dosadašnjih analiza. PDL podijeljen na pet regija uvelike je utjecao na promjenu položaja središta otpora, te se on sada nalazi na udaljenosti 15,7 mm od ruba krune zuba.

**Tablica 9. Pomak ruba krune zuba u ovisnosti o omjeru momenta i sile, linearna analiza i heterogen PDL**

Omjer momenta i sile $M/F$	Pomak ruba krune zuba $\cdot 10^{-5} [\text{mm}]$
-1	24,8
-5/3	11
-5	-2,5

#### 3.4.4. Položaj središta otpora kod nelinearne analize s heterogenim PDL-om



**Slika 50. Krivulje pomaka kod nelinearne analize i heterogenog PDL-a**

Kao i u prošlim analizama vidljivi je da promjena tipa analize, iz linearne u nelinearnu ne utječe u većoj mjeri na položaj središta otpora. On je i dalje na oko 15,7 mm od ruba krune zuba. Vidljive su manje razliku u pomaku ruba krune zuba (tablica 10).



**Tablica 10. Pomak ruba krune zuba u ovisnosti o omjeru momenta i sile, nelinearna analiza i heterogen PDL**

<b>Omjer momenta i sile <math>M/F</math></b>	<b>Pomak ruba krune zuba <math>\cdot 10^{-5}[\text{mm}]</math></b>
-1	23,7
-5/3	9
-5	-6,3

### 3.5. Utjecaj promjene tipa analize i materijalnih svojstava PDL-a na položaj središta otpora

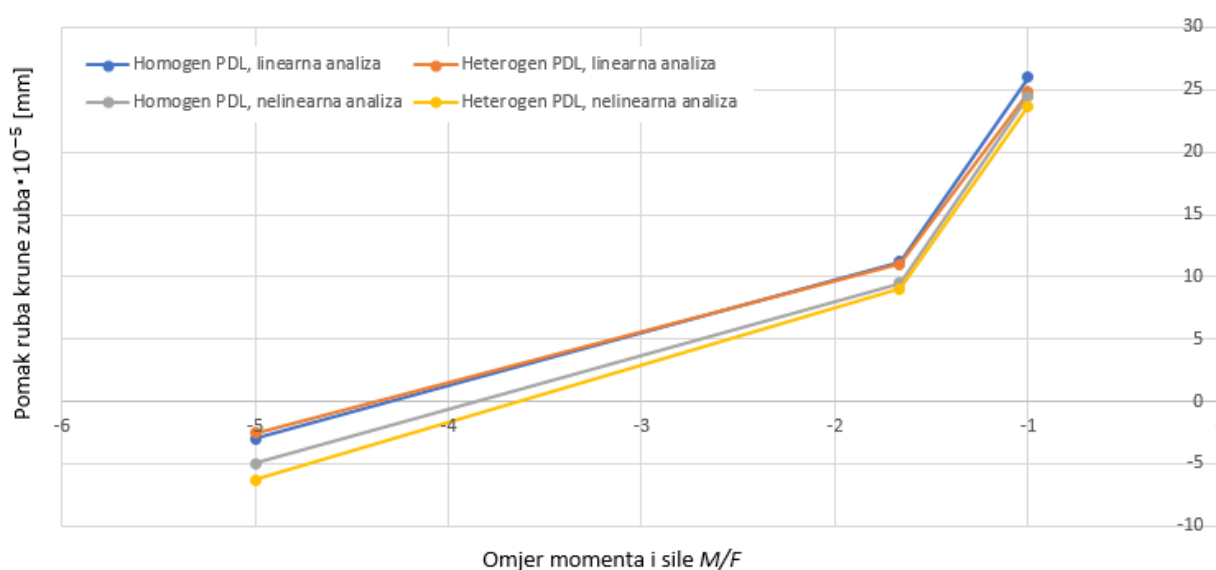
**Tablica 11. Utjecaja tipa analize i svojstvo PDL-a na rezultate**

<b>Tip analize</b>	<b>Svojstvo PDL-a</b>	<b>Položaj središta otpora [mm]</b>	<b>Vrijednost omjera <math>M/F</math></b>	<b>Pomak ruba krune zuba <math>\cdot 10^{-5}[\text{mm}]</math></b>
Linearna	Homogen	13,5	-5	-3
			-5/3	11,2
			-1	26
	Heterogen	15,7	-5	-2,5
			-5/3	11
			-1	24,8
Nelinearna	Homogen	13,5	-5	-5
			-5/3	9,5
			-1	24,5
	Heterogen	15,7	-5	-6,3
			-5/3	9
			-1	23,7

U tablici 11 vidljiv je utjecaj tipa analize i svojstva PDL-a na promjenu položaja središta otpora i pomak vrha krune zuba. Može se primijetiti da promjena analize iz linearne u nelinearnu

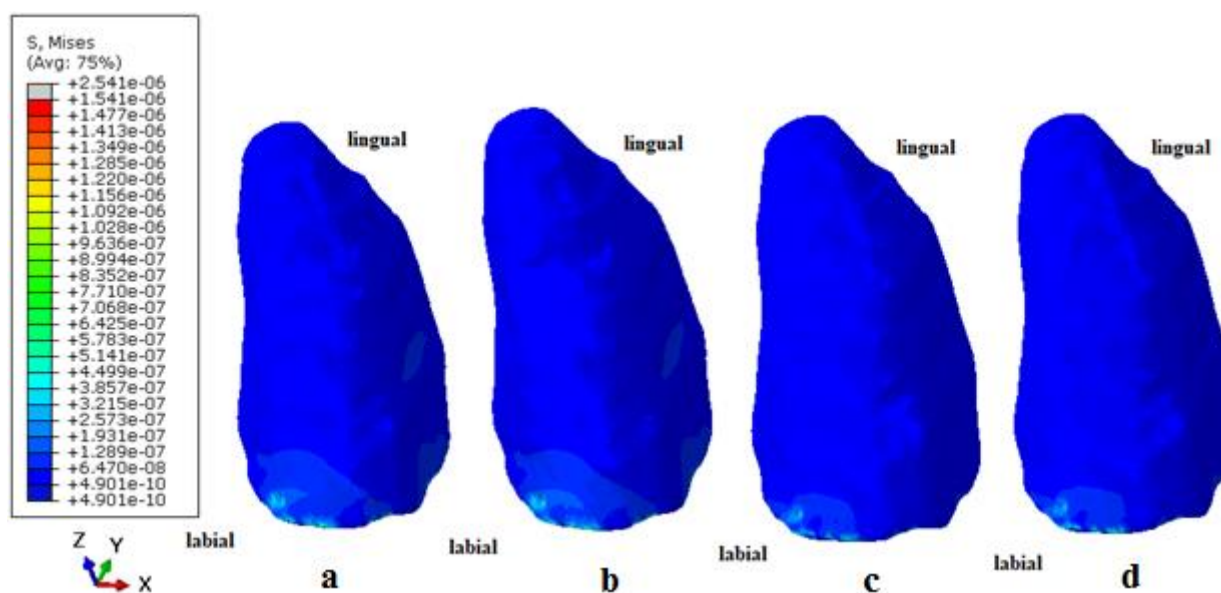
ne utječe u većoj mjeri na položaj središte otpora, ali donekle utječe na vrijednost pomaka ruba korijena zuba.

Slika 51 prikazuje dijagrame pomaka ruba krune zuba u ovisnosti o promjeni omjer momenta i sile  $M/F$ , te promjene tipa analize. Vidljivo je da promjena tipa analize, iako gotovo da i ne utječe na promjenu položaja središta otpora, donekle mijenja vrijednosti pomaka ruba krune zuba, što se posebno očituje kod heterogenog PDL-a. Budući da se ovdje radi o izotropnim materijalima, nelinearna analiza nema veliki utjecaj na konačne rezultate, kao što je vidljivo na slici 51. Opisujući PDL kao heterogen, približava se stvarnom opisu PDL-a, koji je vrlo kompleksan, budući da spada u meka tkiva.

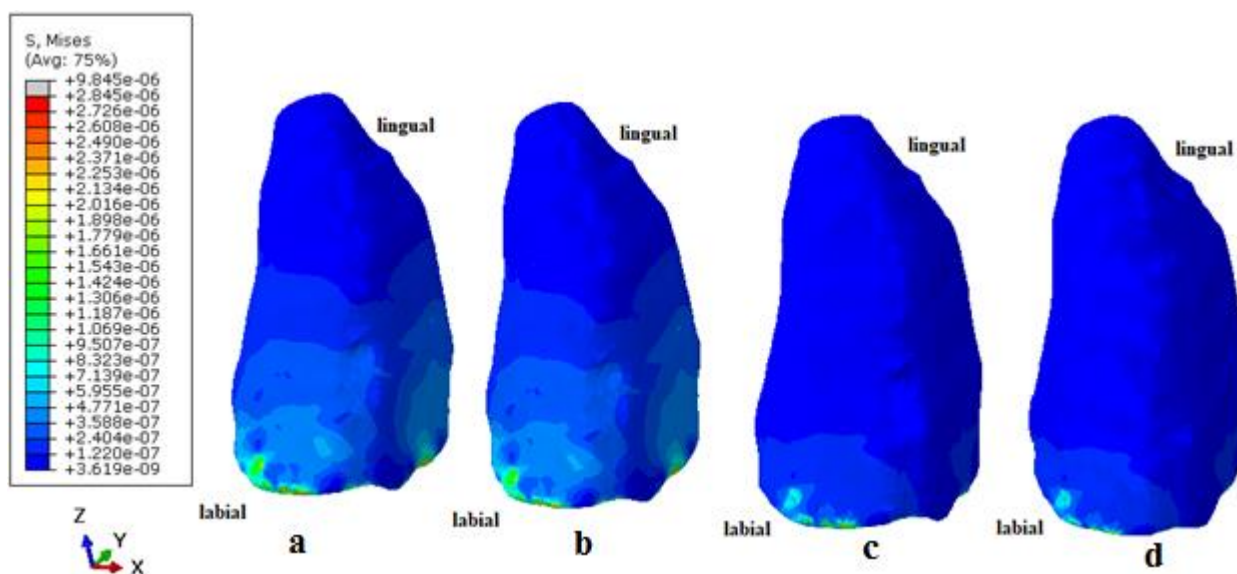


**Slika 51. Dijagrami pomak ruba krune zuba u ovisnosti o promjeni omjer momenta i sile  $M/F$ , te promjene tipa analize**

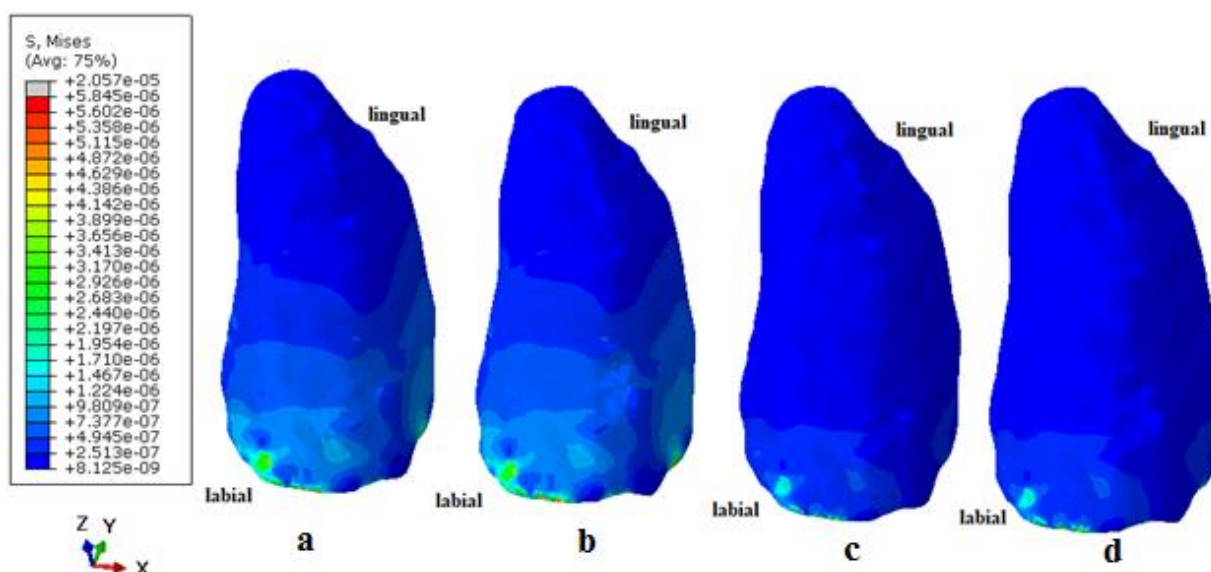
Na slici 52, 53 i 54 vidljivo je da promjena analize iz linearne u nelinearnu gotovo i ne mijenja vrijednosti naprezanja po Mises-u PDL-a. Također se može primijetiti da mehanička svojstva PDL-a utječu na vrijednosti naprezanja. Slika 52 prikazuje rezultate analize kod omjera  $M/F=5$ , slika 53 rezultate omjera  $M/F=5/3$ , a slika 54 rezultate omjera  $M/F=1$ . U slikama su pod *a* rezultati linearno elastične analize sa homogenim PDL-om, pod *b* rezultati nelinearne analize sa homogenim PDL-om, pod *c* rezultati linearno elastične analize sa heterogenim PDL-om, te pod *d* rezultati nelinearne analize sa heterogenim PDL-om.



Slika 52. Razlike u naprezanjima kod linearne i nelinearne analize,  $M/F = -5$ , a) linearni homogeni PDL, b) nelinearni homogeni PDL, c) linearni heterogeni PDL, d) nelinearni heterogeni PDL

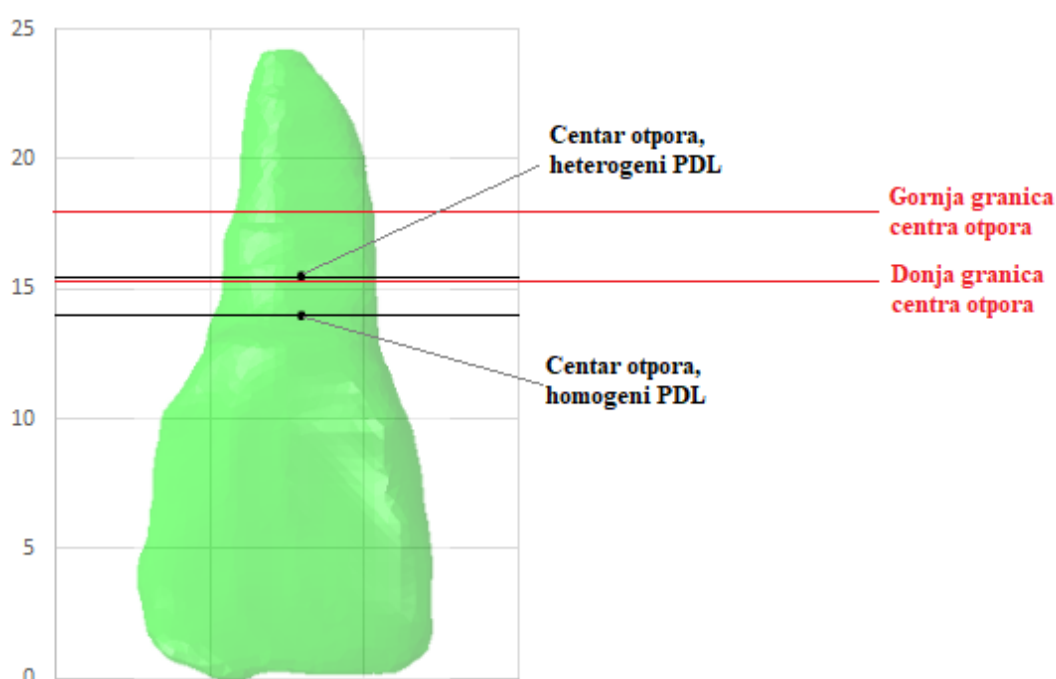


Slika 53. Razlike u naprezanjima kod linearne i nelinearne analize,  $M/F = -5/3$ , a) linearni homogeni PDL, b) nelinearni homogeni PDL, c) linearni heterogeni PDL, d) nelinearni heterogeni PDL



**Slika 54. Razlike u naprezanjima kod linearne i nelinearne analize,  $M/F = -1$ , a) linearni homogeni PDL, b) nelinearni homogeni PDL, c) linearni heterogeni PDL, d) nelinearni heterogeni PDL**

Poznato je da središte otpora jednokorijenskog zuba leži na otprilike 1/3 do 1/2 duljine korijena zuba, na uzdužnoj osi zuba [29]. Duljina korijena promatranog zuba je oko 13,5 mm. Tako bi visina na kojoj se najčešće nalazi središte otpora trebala biti 15,5 do 17,75 mm, To je na oko 63% do 72% visine zuba mjereno od ruba krune. Središte otpora kod homogenog PDL-a je bio na 13,5 mm, a kod heterogenog PDL-a na 15,7 mm (slika 55).



**Slika 55. Položaji središta otpora kod homogenog i heterogenog PDL-a**

Kod homogenog PDL-a središte se nalazio na 55% visine, a kod heterogenog na 65% visine zuba. Iako je kod homogenog PDL-a središte otpora nešto niži od standardnog, rezultat se može smatrati zadovoljavajućim, jer je središte otpora nemoguće egzaktno odrediti zbog mnoštva čimbenika koji na njega utječu.

## 4. ZAKLJUČAK

Nepravilan položaj zuba može dovesti do poremećaja odnosa sila između zubi i potpune neravnoteže prilikom opterećivanja pojedinih dijelova žvačnog sustava. Ovakvo stanje implicira brojnim neželjenim pojavnostima u zdravstvenom i estetskom smislu. Ortodoncija je grana stomatologije koja se bavi liječenjem nepravilnosti položaja zuba. Pri liječenju se koriste ortodontski aparati koji mogu biti fiksni i mobilni, a čija je uloga generiranje i prijenos sile i/ili momenta na zub, te pomicanje zuba u željeni položaj. Prilikom pozicioniranja hvatišta momenta i sile vrlo važnu ulogu igra središte otpora. Središte otpora je točka na zubu koja, ako kroz nju djeluje sila, zub translacija.

U ovome radu promatran je utjecaj mehaničkih svojstava parodontnog ligamenta na poziciju središta otpora. Nakon konvergencije modela izvršeno je dvanaest analiza, od kojih šest linearno elastičnih i šest nelinearnih. Također, analize su podijeljene u četiri grupe. Prvu grupu su činile tri analize izvršene kao linearno elastične s homogenim PDL-om, drugu grupu tri nelinearne analize s homogenim PDL-om, treću grupu tri linearno elastične analize s heterogenim PDL-om i četvrtu tri nelinearne analize s heterogenim PDL-om. U svakoj grupi moment je bio konstantan i iznosio je  $M = -5 \text{ Nmm}$  oko osi  $X$ , a iznos sile se mijenjao te je iznosio 1, 3 i 5 N u smjeru osi  $Y$ .

Rezultati su pokazali da tip analize (linearno elastična ili nelinearna) ne utječe zamjetno na naprezanja ili deformaciju PDL-a i položaj središta otpora. Rezultati su također pokazali da mehanička svojstva PDL-a i njegova uniformnost utječu na vrijednosti naprezanja i deformacije PDL-a, kao i na položaj središta otpora. Kada je PDL homogen, središte otpora se nalazio na 13,5 mm od ruba krune zuba, dok je kod heterogenog PDL-a bio na 15,7 mm od ruba krune zuba.

Rezultati su pokazali da mehanička svojstva PDL-a utječu na poziciju središta otpora, te da PDL utječe na pravilno pozicioniranje hvatišta sile i/ili momenta pri određivanju ortodontske terapije.

## LITERATURA

- [1] <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=67493>, listopad 2017.
- [2] <https://hr.wikipedia.org/wiki/Zub>, listopad 2017.
- [3] <http://www.orto-nova.hr/hr/sve-sto-trebate-znati-o-zubima/58/32>, listopad 2017.
- [4] [http://www.respecta.co.rs/2010/08/08/kojim-redom-ide-nicanje-zuba/#.Wj\\_2U7pFyoV](http://www.respecta.co.rs/2010/08/08/kojim-redom-ide-nicanje-zuba/#.Wj_2U7pFyoV), listopad 2017.
- [5] <http://traveltodentist.com/es/numero-dientes/>, listopad 2017.
- [6] <http://www.health24.com/Medical/Oral-health/Dental-care/possible-causes-of-sensitivity-crown-or-enamel-issues-20170921>, listopad 2017.
- [7] <http://nsveterina.edu.rs/sites/default/files/Gra%C4%91a%20zuba.pdf>, listopad 2017.
- [8] <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=51081>, listopad 2017.
- [9] <http://www.infodentis.com/tooth-anatomy/supporting-structure.php>, listopad 2017.
- [10] <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=46766>, listopad 2017.
- [11] [https://medicine.academic.ru/100479/alveoli\\_dentales\\_maxillae](https://medicine.academic.ru/100479/alveoli_dentales_maxillae), listopad 2017.
- [12] [http://www.sfzg.unizg.hr/\\_download/repository/2011\\_morfologija\\_1\\_vjezba\\_11\\_13\\_zap\\_DF.pdf](http://www.sfzg.unizg.hr/_download/repository/2011_morfologija_1_vjezba_11_13_zap_DF.pdf), listopad 2017.
- [13] <https://pdfs.semanticscholar.org/45e5/cba589169a35ef1eae65c09e7fc1ec63ac4a.pdf>, studeni 2017.
- [14] <https://www.slideshare.net/indiandentalacademy/biomechanics-of-tooth-movement>, studeni 2017.
- [15] Barta M. Utjecaj omjera ortodontskog momenta i sile na gibanje zuba kod ortodontske terapije [diplomski rad]. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2017.
- [16] <https://www.hindawi.com/journals/tswj/2014/617032/fig2/>, studeni 2017.
- [17] <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=61728>, studeni 2017.
- [18] [https://bs.wikipedia.org/wiki/Kompjuterizirana\\_tomografija](https://bs.wikipedia.org/wiki/Kompjuterizirana_tomografija), studeni 2017.

- [19] [https://en.wikipedia.org/wiki/Computed\\_tomography\\_of\\_the\\_head](https://en.wikipedia.org/wiki/Computed_tomography_of_the_head), studeni 2017.
- [20] <https://www.fda.gov/radiationemittingproducts/radiationemittingproductsandprocedures/medicalimaging/medicalxrays/ucml15317.htm>, studeni 2017.
- [21] <http://www3.gehealthcare.in/en/products/categories/computed-tomography>, studeni 2017.
- [22] <http://www.perfendo.org/docs/CBCT/CBCTHowdoesitworkScarfeetal2008.pdf>, , studeni 2017.
- [23] <https://en.wikipedia.org/wiki/Radiodensity>, studeni 2017.
- [24] <https://radiopaedia.org/articles/hounsfield-unit>, studeni 2017.
- [25] Hangartner T.: Thresholding technique for accurate analysis of density and geometry in qct, pqct and  $\mu$ ct images. Journal of Musculoskeletal Neuronal Interact 7(1):9-16, 2007.
- [26] <https://en.wikipedia.org/wiki/Mimics>, prosinac 2017.
- [27] Sorić J.: Metoda konačnih elemenata, Zagreb, 2004.
- [28] Toms S R., Eberhardt A W.: A nonlinear finite element analysis of the periodontal ligament under orthodontic tooth loading. American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics: June 2003
- [29] Kamenar J. Naprezanja u parodontnom ligamentu kod ortodontskog pomaka zuba [završni rad]. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2015.